



TUGAS AKHIR - MO 141326

**ANALISIS *ON BOTTOM STABILITY GAS PIPELINE* : STUDI
KASUS PADA LAUT DALAM DI 1° 15' S 117° 39' E SELAT
MAKASSAR**

KEVIN MIREKEL HAMZAH

NRP. 043114 4000 0135

Dosen Pembimbing

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr.Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

Departemen Teknik Kelautan

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



FINAL PROJECT - MO 141326

*ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS OF GAS PIPELINE :
CASE STUDY FROM THE DEEP SEA OF MAKASSAR
STRAIT AT 1° 15' S 117° 39' E*

KEVIN MIREKEL HAMZAH

NRP. 043114 4000 0135

Supervisors

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr.Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

Department of Ocean Engineering

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2018

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS ON BOTTOM STABILITY GAS *PIPELINE* : STUDI KASUS PADA LAUT DALAM DI 1° 15' S 117° 39' E SELAT MAKASSAR

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi
Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh:

KEVIN MIREKEL HAMZAH

NRP. 04311440000135

Disetujui Oleh:

1. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

(Pembimbing 1)

2. Dr.Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

(Pembimbing 2)

3. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D

(Penguji 1)

Surabaya, Juli 2018

**Analisis *On Bottom Stability Gas Pipeline* : Studi Kasus Pada Laut Dalam Di
1° 15' S 117° 39' E Selat Makassar**

Nama Mahasiswa : Kevin Mirekel Hamzah

NRP : 04311440000135

Departemen : Teknik Kelautan

Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Dr.Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

ABSTRAK

Produk dari minyak dan gas masih merupakan salah satu ketergantungan manusia di era ini, sehingga usaha eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas sangat intensif termasuk di perairan dangkal hingga laut dalam. Untuk menyalurkannya, dibutuhkan alat transportasi salah satunya adalah *pipeline*. Jaringan *pipeline* harus didesain kuat dan stabil, jika *pipeline* mengalami kegagalan akan menimbulkan kerugian ekonomi dan lingkungan yang sangat besar. Oleh karena itu diperlukan beberapa analisis utama, salah satunya adalah analisis On-Bottom Stability. Analisis On-Bottom Stability bertujuan untuk menentukan berat minimum pipa agar dapat stabil di dasar laut. Saat ini, terdapat sebuah perusahaan yang sedang memiliki proyek yang berada di daerah Selat Makassar. *Pipeline* akan diletakkan pada kedalaman 100 m sampai 1426 m di bawah permukaan laut. Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah melakukan analisis On-Bottom Stability untuk *pipeline* dari proyek tersebut untuk menghindari terjadinya kegagalan yang dapat menyebabkan kerugian bagi perusahaan. Metode yang penulis lakukan yaitu melakukan studi literatur dan tinjauan pustaka, pengumpulan data, perhitungan berat, perhitungan beban lingkungan menggunakan Spektrum JONSWAP, perhitungan *On-Bottom Stability* menggunakan DNVGL RP F109, perhitungan gaya dan *safety factor*, dan yang terakhir adalah menganalisa hasil dan penarikan kesimpulan. Dari hasil analisis, pada saat kondisi kosong maupun kondisi operasional, di kedalaman 100 m maupun 1426 m, *pipeline* tersebut stabil secara vertikal maupun lateral.

Kata Kunci : *on-bottom stability, pipeline, selat makassar, concrete coating, spektrum JONSWAP, DNVGL RP F109, laut dalam*

**On Bottom Stability Analysis Of Gas *Pipeline* : Case Study From The Deep
Sea Of Makassar Strait At 1° 15' S 117° 39' E**

Name : Kevin Mirekel Hamzah
NRP : 04311440000135
Department : Ocean Engineering
Supervisors : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Dr.Eng. Yeyes Mulyadi, S.T., M.Sc.

ABSTRACT

The products that are produced out of oil and gas are still one of the human's main dependence in this era. That results to the intensive business of oil and gas exploration and exploitation, including in shallow waters to the deep sea. To distribute it, one of the means of transportation used is by distributing it thorough a *pipeline*. The *pipeline* network must be designed to be strong and stable. If the *pipeline* fails, enormous economic and environmental losses could be the consequences. Therefore, some major analysis is needed and one of them is the On-Bottom Stability analysis. On-Bottom Stability Analysis aims to determine the minimum weight of the pipe to be stable on the seabed. Currently, there is a company working on a project located in the Makassar Strait area. The *pipeline* will be placed at a depth of 100 m to 1426 m below sea level. The purpose of this final project is to analyze the On-Bottom Stability for the *pipeline* of the project to avoid the occurrence of failure that can cause losses for the company. The writer's method is by literature study and literature review, data collection, weight calculation, environmental load calculation using JONSWAP spectrum, On-Bottom Stability calculation using DNVGL RP F109, force calculation and safety factor, analyzing the result and drawing conclusion. Based on the analysis, when the *pipeline* is empty or in the operational condition, at 100 m or 1426 m depth, the *pipeline* is stable vertically and laterally.

Keyword : *on-bottom stability, pipeline, makassar strait, concrete coating, JONSWAP spectrum, DNVGL RP F109, deep sea*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat, berkat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik dan lancar. Tugas Akhir ini berjudul “**Analisis On Bottom Stability Gas Pipeline : Studi Kasus Pada Laut Dalam Di 1° 15’ S 117° 39’ E Selat Makassar**”.

Tugas Akhir ini disusun guna memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Departemen Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Adapun tujuan dari tugas akhir ini adalah melakukan analisis On-Bottom Stability untuk *pipeline* dari proyek sebuah perusahaan untuk menghindari terjadinya kegagalan yang dapat menyebabkan kerugian baik ekonomi maupun lingkungan.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu saran dan kritik sangat diharapkan oleh penulis sebagai bahan penyempurnaan laporan selanjutnya. Penulis berharap semoga laporan ini bermanfaat bagi perkembangan teknologi di bidang rekayasa kelautan, bagi pembaca umumnya dan penulis pada khususnya.

Surabaya, Juli 2018

Kevin Mirekel Hamzah

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini penulis tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Penulis sangat berterima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih dan puji syukur yang sebesar-besarnya kepada Tuhan Yesus Kristus yang selalu menemani serta mendampingi penulis di dalam perjalanan hidup dari awal sampai masa kuliah ini berakhir dan akan berlanjut hingga akhir nanti.

Didalam kesempatan ini juga, penulis menyampaikan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis (Laurensius Agustino Hamzah dan Melanny Susilo) untuk segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah diberikan selama masa kuliah.
2. Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc., sebagai dosen pembimbing 1, untuk pendampingan, semangat, ilmu, dan segala dukungannya dari sebelum sampai setelah menjalani pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Dr. Eng. Yeyes Mulyadi, S.T.,M.Sc., sebagai dosen wali sekaligus dosen pembimbing 2, yang turut memberikan dukungan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S.T. ,M.T., sebagai Kepala Departemen Teknik Kelautan.
5. Bapak Herman Pratikno, S.T., M.T., Ph.D sebagai Koordinator Tugas Akhir.
6. Semua Dosen dan Karyawan Departemen Teknik Kelautan.
7. Bapak Bobby, Dicky, Junaidi, dan karyawan lain perusahaan tempat penulis KP serta teman pendamping KP.
8. Angkatan 2014 Maelstrom.
9. Orang – orang lain yang belum disebutkan namanya yang juga telah membantu dan melancarkan proses perkuliahan ini.

Surabaya, Juli 2018

Kevin Mirekel Hamzah

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Manfaat	2
1.5 Batasan Masalah	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka.....	5
2.2 Landasan Teori	6
2.2.1 Pengertian <i>Offshore Pipeline</i>	6
2.2.2 Aspek Penting Perancangan <i>Pipeline</i>	7
2.2.3 Gaya yang mempengaruhi On-Bottom Stability	8
2.2.4 Gelombang dan Arus	9
2.2.4.1 Spektrum JONSWAP	9
2.2.4.2 Kecepatan Arus.....	13
2.2.5 Tahanan Pasif Tanah.....	14
2.2.6 Gaya Reduksi.....	16
2.2.6.1 Reduksi beban akibat <i>permeable seabed</i>	17
2.2.6.2 Reduksi beban akibat penetrasi.....	17
2.2.6.3 Reduksi beban akibat <i>trenching</i>	18
2.2.7 On-Bottom Stability.....	19
2.2.7.1 Berat Terendam <i>Pipeline</i>	19

2.2.7.2	Kombinasi Pembebanan	20
2.2.7.3	<i>Absolute Lateral Static Stability</i>	21
2.2.7.4	Stabilitas Vertikal	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		25
3.1	Diagram Alir (Flow Chart)	25
3.2	Penjelasan Diagram Alir	26
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN.....		30
4.1	Analisis Stabilitas Vertikal	30
4.2	Analisis Stabilitas Lateral	31
4.3	Analisis <i>Safety Factor</i>	33
4.4	Analisis Perbandingan Kedalaman	35
4.5	Permodelan Menggunakan ANSYS CFX.....	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....		38
5.1	Kesimpulan	38
5.2	Saran	39
DAFTAR PUSTAKA		40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Flowchart Urutan Proses Desain <i>Pipeline</i>	7
Gambar 2.2 Skema Gaya yang Bekerja pada Pipa Bawah Laut.....	7
Gambar 2.3 Kecepatan Aliran Amplitudo Signifikan, U_s , pada permukaan <i>seabed</i>	12
Gambar 2.4 Mean Zero Up-Crossing Period Osilasi Aliran, T_u , pada permukaan <i>seabed</i>	12
Gambar 2.5 Resistensi Pasif	15
Gambar 2.6 Definisi Penetrasi	17
Gambar 2.7 Reduksi Beban Puncak akibat Penetrasi	18
Gambar 2.8 Definisi Parameter Trench	19
Gambar 2.9 Reduksi Beban Puncak akibat trenching	19
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	25
Gambar 4.1 Grafik Berat Lapisan dan Gaya Apung Pipa Case 1 dan Case 2	30
Gambar 4.2 Grafik Nilai Kriteria untuk Analisis Stabilitas Vertikal	31
Gambar 4.3 Grafik Gaya – Gaya Hidrodinamis pada Case 1	32
Gambar 4.4 Grafik Gaya – Gaya Hidrodinamis pada Case 2	32
Gambar 4.5 Grafik Nilai Kriteria untuk Analisis Stabilitas Lateral.....	33
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Gaya Hidrodinamis.....	35
Gambar 4.7 Model Pipeline <i>Case 1</i> di ANSYS CFX.....	36
Gambar 4.8 Hasil Simulasi Pipeline <i>Case 1</i> di ANSYS CFX.....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kekasaran <i>Seabed</i> (DNVGL-RP-F109, 2017).....	14
Tabel 2.2	<i>Safety Factor</i> , Badai Musim Dingin di Laut Utara.....	22
Tabel 2.3	<i>Safety Factor</i> , Badai Musim Dingin di Teluk Meksiko dan Laut Selatan.....	22
Tabel 2.4	<i>Safety Factor</i> kondisi siklon di North West Shelf	22
Tabel 2.5	<i>Safety Factor</i> kondisi siklon di Teluk Meksiko.....	22
Tabel 2.6	Koefisien Beban Puncak Horisontal	23
Tabel 2.7	Koefisien Beban Puncak Vertikal.....	23
Tabel 3.1	Tabel Data Pipa.....	27
Tabel 4.1	Perhitungan <i>Safety Factor Case 1</i>	34
Tabel 4.2	Perhitungan <i>Safety Factor Case 2</i>	34
Tabel 4.3	Hasil Nilai Gaya dari ANSYS CFX	34
Tabel 4.4	Nilai Error Perhitungan ANSYS CFX dan manual	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Perhitungan *On-Bottom* Stability

Lampiran B Perhitungan Spektrum JONSWAP

Lampiran C Data Batimetri *Field* di Selat Makassar

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Produk dari minyak dan gas masih merupakan salah satu ketergantungan manusia di era ini, sehingga usaha eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas sangat intensif termasuk di perairan dangkal hingga laut dalam. Untuk memindahkan minyak atau gas dari sumur ke daratan, dibutuhkan alat transportasi seperti kapal. Selain kapal, *pipeline* dapat menjadi alternatif lain untuk menyalurkan minyak dan gas. *Pipeline* digunakan untuk berbagai maksud dalam pengembangan sumber daya hidrokarbon di lepas pantai, termasuk pipa transportasi untuk ekspor, pipa penyalur untuk mengangkut produksi dari suatu platform ke pipa ekspor (Soegiono, 2007). Dengan menggunakan *pipeline*, biaya transportasi minyak dan gas berkurang menjadi seperlima (Soegiono, 2005).

Dikarenakan fungsi *pipeline* yang vital, maka jaringan pipa harus didesain kuat dan stabil terhadap gaya-gaya yang bekerja padanya, baik pada saat instalasi, inspeksi dan perawatan dibutuhkan pertimbangan yang lebih seksama. *Pipeline* telah menunjukkan kemampuan untuk bertahan pada berbagai macam kondisi lingkungan yang buruk (Guo et al, 2005). Namun, jika *pipeline* mengalami kegagalan akan menimbulkan kerugian ekonomi dan lingkungan yang sangat besar, sehingga perancangannya memerlukan banyak analisis (Tian et al., 2015).

Beban lingkungan yang paling mempengaruhi stabilitas pipa adalah kombinasi antara beban arus dan beban gelombang. Kegagalan-kegagalan yang dapat terjadi antara lain tegangan akibat tekanan internal dan eksternal yang melebihi batas tegangan yang diijinkan, perpindahan pipa akibat ekspansi termal yang terlalu besar, kegagalan akibat buckling, terjadi korosi yang menyebabkan pipa bocor, kegagalan akibat beban dinamik, dan lain-lain (Munari, 2007). Fenomena-fenomena di atas sering terjadi di lapangan, sehingga dapat mengarah pada terjadinya kegagalan struktur *pipeline* keseluruhan. Kegagalan struktur *pipeline* tersebut sering berperan penting pada kerugian ekonomi dan lingkungan.

Dengan adanya masalah tersebut, diperlukan beberapa analisis utama, salah satunya adalah analisis *On-Bottom Stability*. Analisis *On-Bottom Stability* bertujuan

untuk menentukan berat minimum pipa agar dapat stabil di dasar laut (Bai dan Bai, 2005). *Pipeline* dikatakan stabil apabila gaya tahanan tanah lebih besar daripada gaya akibat beban hidronamis yang bekerja pada pipa (Teh et al., 2006).

Saat ini, terdapat sebuah perusahaan yang sedang memiliki proyek yang berada di daerah Selat Makassar. *Pipeline* akan diletakkan pada kedalaman 100 m sampai 1426 m di bawah permukaan laut. Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisis *On-Bottom Stability* untuk *pipeline* dari proyek tersebut untuk menghindari terjadinya kegagalan yang dapat menyebabkan kerugian bagi perusahaan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah:

1. Berapa besar gaya eksternal yang bekerja pada *pipeline* berdasarkan DNVGL RP F109?
2. Bagaimanakah hasil analisis *On-Bottom Stability* dari *pipeline* proyek tersebut dengan menggunakan DNVGL RP F109?
3. Bagaimanakah pengaruh variasi penambahan kedalaman terhadap tebal concrete dan Safety Factor *pipeline* dari proyek tersebut?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Mengetahui besar gaya eksternal yang bekerja pada *pipeline* berdasarkan DNVGL RP F109.
2. Mengetahui hasil analisis *On-Bottom Stability* dari *pipeline* proyek tersebut dengan menggunakan DNVGL RP F109.
3. Mengetahui pengaruh variasi penambahan kedalaman terhadap tebal concrete dan Safety Factor *pipeline* dari proyek tersebut.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat dalam tugas akhir ini adalah:

1. Diharapkan hasil dari tugas akhir ini dapat membantu dan menjadi bahan pertimbangan bagi perusahaan untuk memasang *pipeline* tersebut.

2. Mendapatkan pengalaman untuk penyelesaian masalah *On-Bottom Stability* pada *pipeline*.
3. *Pipeline* pada proyek tersebut akan didesain dengan aman karena berdasar pada standar yang ada.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Analisis *On-Bottom Stability* menggunakan DNVGL RP F109.
2. Metode *On-Bottom Stability* yang digunakan adalah Absolute Lateral Static Stability method.
3. Analisis *On-Bottom Stability* dilakukan pada kedalaman 100m dan 1426m.
4. Analisis *On-Bottom Stability* dilakukan pada bagian dengan permukaan tanah yang datar.
5. Aliran fluida dalam pipa bersifat *steady*.
6. Tidak ada absorpsi air pada concrete.

1.6 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan dalam tugas akhir ini adalah:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bagian ini penulis menjelaskan mengenai latar belakang permasalahan dari tugas akhir yang akan dilakukan, rumusan masalah, tujuan yang hendak dicapai dalam percobaan, manfaat penelitian kedepannya setelah percobaan ini berhasil dilakukan, batasan masalah yang menjadi pembatas dalam melakukan penelitian, dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Pada bagian ini penulis menjelaskan beberapa teori dasar yang mendukung analisis *On-Bottom Stability* pada tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bagian ini penulis menggambarkan dan menjelaskan diagram alir (flow chart) langkah-langkah dalam melakukan tugas akhir ini yang tersusun secara sistematis.

BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini penulis menjelaskan hasil perhitungan yang didapat dan diolah dari data yang ada.

BAB V PENUTUP

Pada bagian ini penulis menarik kesimpulan berdasarkan tujuan yang hendak dicapai, serta memberikan saran pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Salah satu permasalahan utama pada *pipeline* adalah ketidakstabilan akibat gelombang laut (Herbich, 1985). Ghebreghiorgis (2014) mengatakan jika *pipeline* terlalu ringan, maka pipa akan bergerak secara lateral dan vertikal karena gaya hidronamis dan gaya apung. Ketidakstabilan dapat menimbulkan regangan dan tegangan yang bersifat siklis pada pipa yang selanjutnya menyebabkan pipa mengalami kegagalan. Jika *pipeline* terlalu berat, maka proses instalasinya menjadi sulit dan mahal karena keterbatasan kapal instalasi dan tensioner.

Teori Coulomb friction menjelaskan interaksi pipa dan tanah untuk memastikan pipa tidak berpindah secara lateral. Sampai tahun 1970-an, teori Coulomb friction merupakan satu-satunya cara untuk memperkirakan tahanan tanah terhadap perpindahan *pipeline* akibat beban hidrodinamis. Pada teori ini, efek tahanan tanah karena tumpukan tanah yang terbentuk pada proses perpindahan pipa diabaikan (Jeng et al., 2013).

Dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan pesatnya perkembangan industri minyak dan gas yang menggunakan *pipeline* sebagai alat untuk menyalurkan hidrokarbon, telah banyak peneliti yang fokus menyelesaikan permasalahan stabilitas pipa akibat gelombang laut (Brennodden et al., 1989; Allen et al., 1989; Foda et al., 1990). Namun, permasalahan tidak sepenuhnya terselesaikan karena kompleksitas karakteristik tanah dan geometri pipa (Lawlor and Flynn, 1991). Sejak tahun 1980-an, banyak studi eksperimen mengenai stabilitas *pipeline* yang tidak tertanam.

Wagner et al. (1987) mengembangkan teori Coulomb friction menjadi model empiris perilaku pipa terhadap tanah, dimana tahanan lateral total diasumsikan sebagai penjumlahan komponen Coulomb friction dan komponen soil passive resistance. Penelitian menunjukkan bahwa metode desain berdasarkan teori Coulomb friction terlalu konservatif. Pada studi eksperimen diatas, beban gelombang tidak dimodelkan dengan metode hidrodinamis tetapi digantikan dengan aktuator mekanis dan tidak diisi air ke dalam tangki.

Verley et al. (1987) mengembangkan model baru dalam memprediksi gaya hidrodinamis pada *pipeline*, yaitu dengan studi perbandingan pemodelan hidrodinamis di laboratorium dan di lapangan. Berdasarkan banyak hasil pemodelan dengan program komputer PONDUS didapatkan parameter non-dimensional yang dapat digunakan untuk memprediksi perpindahan lateral *pipeline* (Lambrakos et al, 1987). Verley dan Sotberg (1992) menggunakan tiga sumber data uji coba pipa, PIPESTAB AGA dan DHI untuk mengembangkan dan validasi model tahanan tanah terhadap pipa. Dari penelitian tersebut didapatkan formula passive resistance untuk memperhitungkan tahanan tanah karena tumpukan tanah yang terbentuk pada proses perpindahan pipa.

DNV RP E305 (1988) diterbitkan untuk analisis on-bottom stability berdasarkan studi hidrodinamis di lapangan pada proyek *pipeline* stability yang dilakukan oleh SINTEF (1983-1987). Analisis pada code ini tidak memperhitungkan efek penetrasi pipa bawah laut ke dalam tanah, sedangkan perpindahan lateral maksimal yang diijinkan adalah 20 meter. DNV RP F109 (2007) diterbitkan untuk menggantikan DNV RP E305.

Dengan metode tersebut, Ridlwan (2017) dan Sibuea (2017) telah menghitung stabilitas *pipeline* dengan variasi tebal concrete coating, sehingga didapat hasil desain stabilitas *pipeline* yang dapat memenuhi faktor keamanan vertikal maupun lateral. Pada code ini efek penetrasi pipa diperhitungkan, namun tidak bisa digunakan untuk pipa yang sepenuhnya tertanam. Perpindahan lateral maksimal yang diijinkan pada code ini adalah 10 kali diameter. Revisi terbaru DNV RP F109 diterbitkan oleh DNV pada tahun 2017 yaitu perubahan nama menjadi DNVGL RP F109.

2.2 Landasan Teori

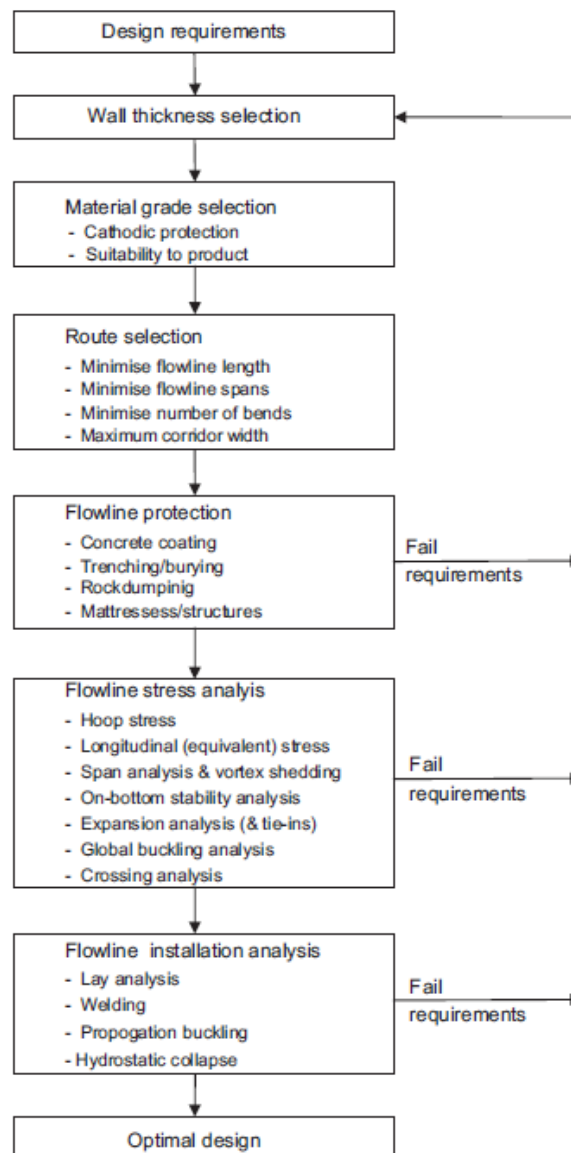
2.2.1 Pengertian Offshore Pipeline

Istilah *pipeline* diartikan sebagai bentangan pipa fluida dengan jarak yang sangat panjang. Komoditas yang sering ditransportasikan adalah air, gas alam, minyak mentah, dan produksi hasil pengolahan minyak bumi lainnya (Liu, 2003). *Pipeline* digunakan dalam berbagai macam tujuan salah satu diantaranya adalah sebagai trunk line yakni mengangkut minyak dan/atau gas dari fasilitas produksi

menuju daratan (Mousselli, 1981). Dalam proses desain *pipeline*, salah satu permasalahan utama pada *pipeline* adalah ketidakstabilan akibat gelombang laut (Herbich, 1985).

2.2.2 Aspek Penting Perancangan *Pipeline*

Desain *engineering* pipa adalah proses yang harus dijalankan secara sistematis. Mendesain sebuah proses harus dimulai tahap demi tahap mengikuti dasar teori yang sesuai, standar-standar dan kode internasional. Proses desain ini memiliki parameter dan input yang cukup kompleks. Gambar 2.1 akan menggambarkan urutan dari proses desain *pipeline* secara detail.



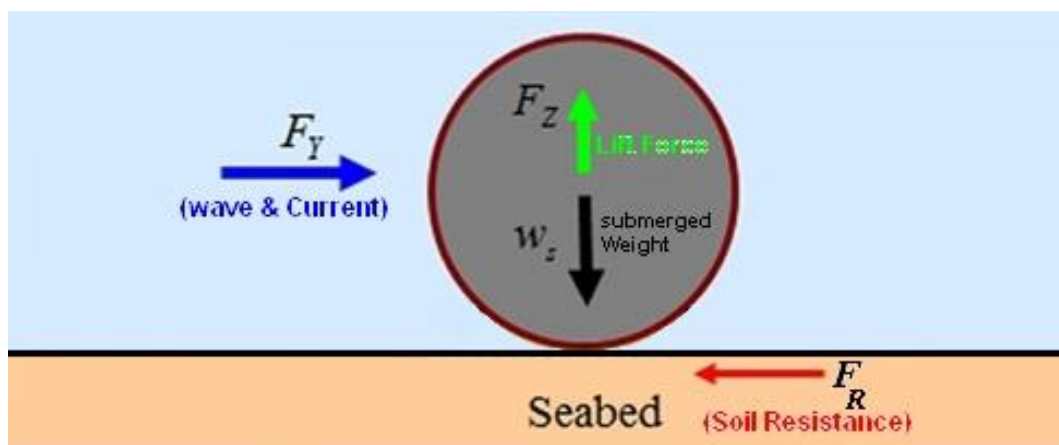
Gambar 2.1 Flowchart Urutan Proses Desain *Pipeline*

Banyak aspek yang harus diperhatikan dalam perancangan *pipeline* khususnya *offshore pipeline* agar didapatkan suatu rancangan yang optimal baik dari segi teknik maupun ekonomis. Aspek-aspek tersebut adalah :

- a. Tebal dinding (*wall thickness*)
- b. Pemilihan material (*material section*)
- c. Peninjauan rute (*route survey*)
- d. Pemilihan rute (*route selection*)
- e. Data lingkungan (*enviromental data*)
- f. Perlindungan katodik (*cathodic protection*) terhadap korosi
- g. Kestabilan pada permukaan bawah laut (*on-bottom stability*)
- h. Analisis tekuk (*buckling analisys*)
- i. Analisis lelah (*fatigue analisys*)
- j. Ekspansi termal (*thermal expansion*)
- k. Analisis terhadap pipa yang tidak tertumpu (*span analysis*)

2.2.3 Gaya yang mempengaruhi On-Bottom Stability

Stabilitas pipa bawah laut dipengaruhi oleh pembebanan hidrodinamika dan ketahanan tanah. Bila beban cukup besar, gaya-gaya dapat mengganggu kestabilan pipa yang menyebabkan pengapungan atau gerakan secara lateral. Menurut Bai et al (2015), pendekatan yang paling umum digunakan dalam industri untuk menilai stabilitas pipa yang terendam adalah membuat asumsi konservatif berdasarkan pembebanan hidrodinamik dan ketahanan tanah. Pada Gambar 2.9 dibawah ini merupakan skema gaya yang bekerja pada pipa bawah laut (subsea pipeline).



Gambar 2.2 Skema Gaya yang Bekerja pada Pipa Bawah Laut

2.2.4 Gelombang dan Arus

2.2.4.1 Spektrum JONSWAP

Gelombang laut acak dalam kurun waktu pendek dapat dijelaskan dengan spektra gelombang. Menurut DNVGL RP F109 untuk menghitung beban dari gelombang laut yang diterima oleh *pipeline* diwajibkan menggunakan spektrum JONSWAP, selain itu menurut Djatmiko (2012) penggunaan spektrum JONSWAP dapat digunakan pada laut yang mempunyai karakteristik tertutup, hal ini sesuai dengan lokasi *pipeline* yang menjadi bahasan dalam Tugas Akhir ini yaitu di Selat Makassar. Dengan demikian hasil dari perhitungan spektrum akan dijadikan nilai untuk menghitung beban dari gelombang laut. Spektrum JONSWAP secara umum dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)} \quad (2.1)$$

dengan,

- α = konstanta Generalized Philips
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- ω = frekuensi gelombang
- ω_p = frekuensi gelombang puncak
- γ = *peak-enhancement factor*
- σ = parameter lebar spektra

dimana konstanta Generalized Philips didapatkan dari persamaan berikut:

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma) \quad (2.2)$$

dengan,

- H_s = tinggi gelombang signifikan (m)
- ω_p = frekuensi gelombang puncak
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)
- γ = *peak-enhancement factor*

kemudian parameter lebar spektra didapatkan dari persamaan berikut:

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (2.3)$$

dan *Peak-enhancement factor* didapatkan dari persamaan berikut:

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases} \quad \varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \quad (2.4)$$

Setelah itu, spektrum kecepatan yang diinduksi gelombang (*wave induced velocity spectrum*) di seabed $S_{UU}(\omega)$ bisa didapat melalui transformasi spektral gelombang di permukaan laut menggunakan teori gelombang orde pertama melalui persamaan berikut:

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega) \quad (2.5)$$

dengan,

G = *Transfer Function*

$S_{\eta\eta}$ = spektrum JONSWAP

Fungsi transfer G mentransformasi elevasi permukaan laut menjadi kecepatan aliran yang diinduksi gelombang di dasar laut melalui persamaan berikut:

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)} \quad (2.6)$$

dimana d dan k didapatkan dari iterasi menggunakan persamaan *transcendental* sebagai berikut:

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d) \quad (2.7)$$

dengan,

ω = frekuensi gelombang

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

k = angka gelombang

d = kedalaman perairan

Momen spektra pada orde ke-n didefinisikan pada persamaan berikut:

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega \quad (2.8)$$

dengan,

ω = frekuensi gelombang

Amplitudo kecepatan aliran signifikan pada permukaan pipa didefinisikan pada persamaan berikut :

$$U_s = 2\sqrt{M_0} \quad (2.9)$$

dengan,

M_0 = momen spektra orde pertama

Tidak direkomendasikan untuk mempertimbangkan setiap efek *boundary layer* pada kecepatan yang diinduksi gelombang. *Mean zero up-crossing period* osilasi aliran pada permukaan pipa dicari menggunakan persamaan berikut:

$$T_u = 2\pi \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \quad (2.10)$$

dengan,

M_0 = momen spektra orde pertama

M_2 = momen spektra orde ke-2

Dengan asumsi teori gelombang linier, U_s bisa diambil dari Gambar 2.2 dan T_u dari Gambar 2.3, menggunakan T_n yang didapat dari persamaan berikut:

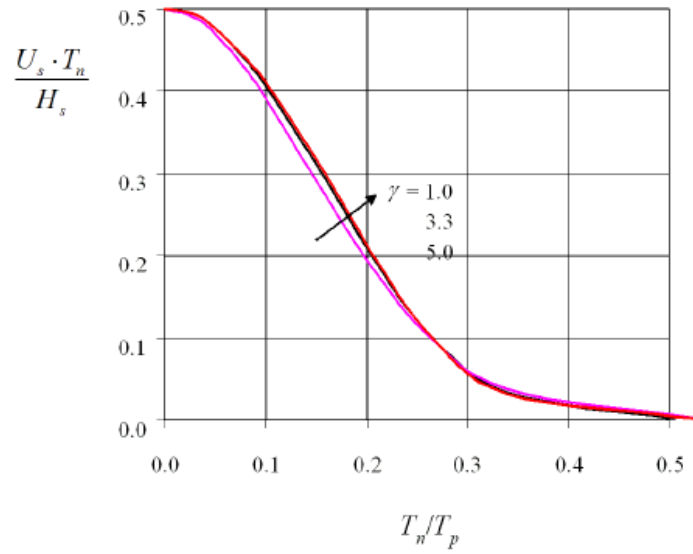
$$T_n = \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (2.11)$$

dengan,

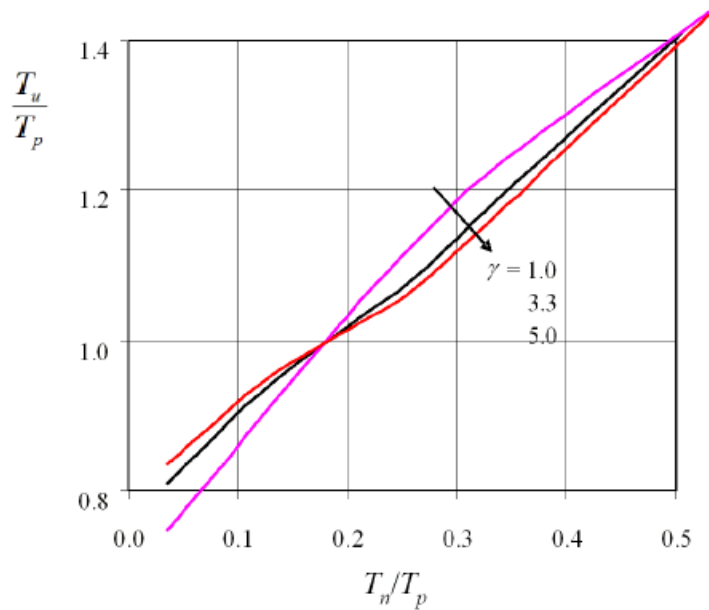
T_n = *reference period*

d = kedalaman perairan

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)



Gambar 2.3 Kecepatan Aliran Amplitudo Signifikan, U_s , pada permukaan *seabed* (DNVGL-RP-F109, 2017)



Gambar 2.4 Mean Zero Up-Crossing Period Osiliasi Aliran, T_u , pada permukaan *seabed* (DNVGL-RP-F109, 2017)

Rasio antara amplitudo kecepatan osilasi desain tunggal dan amplitudo kecepatan desain spektral untuk osilasi τ adalah:

$$k_U = \frac{U^*}{U_s} = \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln \tau} + \frac{0,5772}{\sqrt{2 \cdot \ln \tau}} \right) \quad (2.12)$$

Rasio antara periode kecepatan osilasi desain tunggal dan periode zero up-crossing rata-rata (keduanya di permukaan *seabed*) adalah:

$$k_T = \frac{T^*}{T_u} = \begin{cases} k_t - 5 \cdot (k_t - 1) \cdot T_n/T_u & \text{untuk } T_n/T_u \leq 0,2 \\ 1 & \text{untuk } T_n/T_u > 0,2 \end{cases} \quad (2.13)$$

dimana,

$$k_t = \begin{cases} 1,25 & \text{untuk } \gamma = 1,0 \\ 1,21 & \text{untuk } \gamma = 3,3 \\ 1,17 & \text{untuk } \gamma = 5,0 \end{cases}$$

2.2.4.2 Kecepatan Arus

Arus ditentukan dari analisis statistik data yang direkam dan simulasi model numerik. Arus steady pada pipa mempunyai keterkaitan dengan:

- Pasang surut
- Angin
- Gelombang akibat badai
- Densitas

Arah kecepatan arus diperhitungkan melalui θ_c yang merupakan sudut antara kecepatan arus dan sumbu pipa. Jika tidak ada informasi yang tersedia mengenai θ_c , maka arus diasumsikan bekerja tegak lurus dengan pipa.

Arus acuan, $V_c(Z_r)$, diukur pada kedalaman yang variasi kecepatan arusnya kecil pada arah horizontal. Pada dasar laut yang relatif datar, tinggi acuan bisa lebih besar 1 meter, tergantung dari kekasaran dasar lautnya yang dapat dilihat pada Tabel 2.1. Kecepatan arus dapat tereduksi karena efek dasar laut dan arah arus. Kecepatan arus yang tereduksi dijelaskan dengan persamaan berikut:

$$V(z) = V(z_r) \cdot \frac{\ln(z + z_0) - \ln z_0}{\ln(z_r + z_0) - \ln z_0} \cdot \sin \theta_c \quad (2.14)$$

dengan,

$V(z)$ = kecepatan arus pada pipa (m/s)

$V(z_r)$ = kecepatan arus acuan pada pipa (m/s)

z = kedalaman

z_0 = parameter kekasaran *seabed* (lihat Tabel 2.1) (m)

θ_c = sudut antara arah datang arus dan pipa

Tabel 2.1 Kekasaran *Seabed* (DNVGL-RP-F109, 2017)

<i>Seabed</i>	<i>Grain size d_{50} [mm]</i>	<i>Roughness z_0 [m]</i>
Silt and clay	0.0625	$\approx 5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	0.25	$\approx 1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	0.5	$\approx 4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	1.0	$\approx 1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	4.0	$\approx 3 \cdot 10^{-4}$
Pebble	25	$\approx 2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	125	$\approx 1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	500	$\approx 4 \cdot 10^{-2}$

Sementara itu, kecepatan rata-rata tegak lurus terhadap diameter pipa dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$V_c = V_c(z_r) \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{z_0}{D}\right) \cdot \ln\left(\frac{D}{z_0} + 1\right) - 1}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \right) \cdot \sin \theta_c \quad (2.15)$$

dengan,

$V_c(z_r)$ = kecepatan rata-rata tegak lurus acuan terhadap diameter pipa (m/s)

z_0 = parameter kekasaran *seabed* (Tabel 2.1) (m)

θ_c = sudut antara arah datang arus dan pipa ($^\circ$)

D = diameter luar pipa termasuk semua *coating* (m)

2.2.5 Tahanan Pasif Tanah

Tanah harus memiliki tahanan yang cukup untuk mengimbangi beban hidrodinamika dalam menghindari gerakan lateral. Resistensi tanah terdiri dari dua bagian :

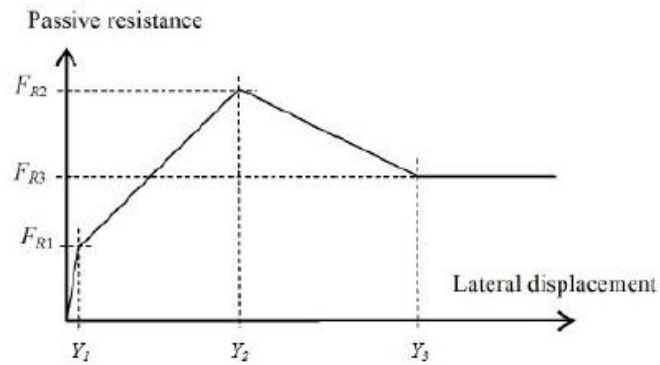
1. Coulomb friction
2. Resistensi pasif akibat penumpukan penetrasi tanah saat pipa bergerak secara lateral seperti pada Gambar 2.4

Pasir didefinisikan sebagai tanah yang *permeable* dan dengan efek kohesif diabaikan. Lempung didefinisikan sebagai tanah yang tidak *permeable* dengan efek

kohesif yang signifikan. Batusan didefinisikan sebagai batuan hancur dengan 50 persen diameter *fractile* lebih besar dari 50 mm.

Koefisien gesek μ , biasanya, untuk pipa yang menggunakan *concrete coating*, menggunakan 0,6 untuk pasir, 0,2 untuk lempung, dan 0,6 untuk batu. Model khas untuk resistensi tanah pasif terdiri dari empat daerah yang berbeda:

1. Daerah elastis dimana perpindahan lateralnya kecil
2. Suatu daerah dimana perpindahan signifikan mungkin dialami, dimana interaksi pipa-tanah menyebabkan peningkatan penetrasi dan resistensi tanah pasif
3. Daerah setelah *break-out* dimana penetrasi dan resistensi dan penetrasi berkurang.
4. Ketika perpindahan melebihi biasanya 1 kali diameter, resistensi pasif dan penetrasi dapat diasumsikan konstan.



Gambar 2.5 Resistensi Pasif (DNVGL-RP-F109, 2017)

Berdasarkan DNVGL-RP-F114 (2017) tentang *pipe-soil interaction for submarine pipelines*, resistensi pasif untuk tanah pasir adalah:

$$\frac{F_R}{F_C} = (5 \cdot k_s - 0,15 \cdot k_s^2) \cdot \left(\frac{Z_p}{D}\right)^{1,25} \quad \text{untuk } k_s \leq 26,7 \quad (2.16)$$

$$\frac{F_R}{F_C} = k_s \cdot \left(\frac{Z_p}{D}\right)^{1,25} \quad \text{untuk } k_s > 26,7 \quad (2.17)$$

Sedangkan untuk tanah lempung:

$$\frac{F_R}{F_C} = \frac{4,1 \cdot k_c}{G_c^{0,39}} \cdot \left(\frac{Z_p}{D}\right)^{1,31} \quad (2.18)$$

Kedalaman penetrasi total merupakan penjumlahan dari kedalaman penetrasi awal dan penetrasi akibat perpindahan pipa:

$$z_p = z_{pi} + z_{pm} \quad (2.19)$$

dimana penetrasi awal pada tanah pasir adalah:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0,037 \cdot k_s^{-0,67} \quad (2.20)$$

dan penetrasi awal pada tanah lempung adalah:

$$\frac{z_{pi}}{D} = 0,0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0,3}}{k_c} \right)^{3,2} + 0,062 \cdot \left(\frac{G_c^{0,3}}{k_c} \right)^{0,7} \quad (2.21)$$

dengan,

D = diameter luar pipa termasuk semua *coating* (m)

F_c = $w_s - F_z$

F_R = resistensi tanah pasif (N/m)

F_z = beban hidrodinamika vertikal (lift) (N/m)

$G_C = \frac{S_u}{D \cdot \gamma_s}$

S_u = *undrained clay shear strength*

z_{pi} = kedalaman penetrasi awal (m)

z_{pm} = kedalaman penetrasi akibat pergerakan pipa (m)

z_p = kedalaman penetrasi total (m)

γ_s = *dry unit soil weight* (18,000 N/m³ untuk *clay*)

γ'_s = *submerged unit soil weight*

$k_C = \frac{S_u \cdot D}{F_C}$

$k_s = \frac{\gamma'_s \cdot D^2}{F_C}$

2.2.6 Gaya Reduksi

Beban hidrodinamika dapat tereduksi karena *Permeable seabed* ($r_{perm,i}$), Penetrasi pipa ke dalam tanah ($r_{pen,i}$) dan/atau, *Trenching* ($r_{tr,i}$) yang dapat dilihat melalui persamaan beban reduksi total berikut:

$$r_{tot,i} = r_{perm,i} \cdot r_{pen,i} \cdot r_{tr,i} \quad (2.22)$$

dimana simbol “i” dapat bernilai y untuk beban horisontal dan z untuk beban vertikal.

2.2.6.1 Reduksi beban akibat *permeable seabed*

Permeable seabed akan memberikan aliran di *seabed* di bawah pipa sehingga mengurangi beban vertikal. Jika beban hidrodinamis vertikal yang digunakan didasarkan pada koefisien beban yang diturunkan dari asumsi *non-permeable seabed*, reduksi beban berikut dapat digunakan:

$$r_{perm,z} = 0,7 \quad (2.23)$$

2.2.6.2 Reduksi beban akibat penetrasi

Faktor reduksi beban akibat penetrasi baik arah horisontal maupun arah vertikal (Gambar 2.6) masing-masing yakni sebagai berikut:

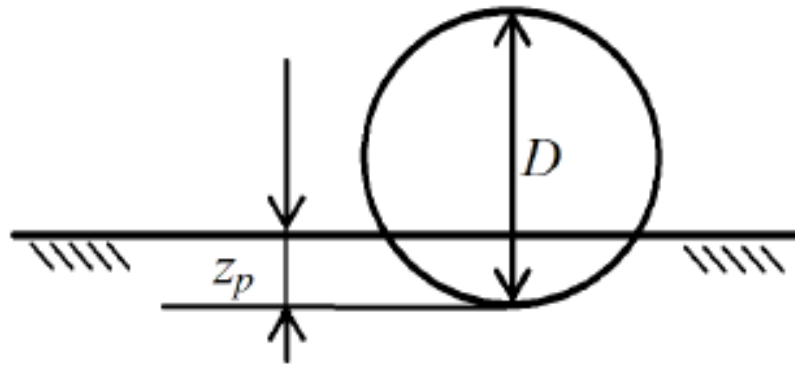
$$r_{pen,y} = 1,0 - 1,4 \cdot \frac{z_p}{D} \geq 0,3 \quad (2.24)$$

$$r_{pen,z} = 1,0 - 1,3 \cdot \left(\frac{z_p}{D} - 0,1 \right) \geq 0,0 \quad (2.25)$$

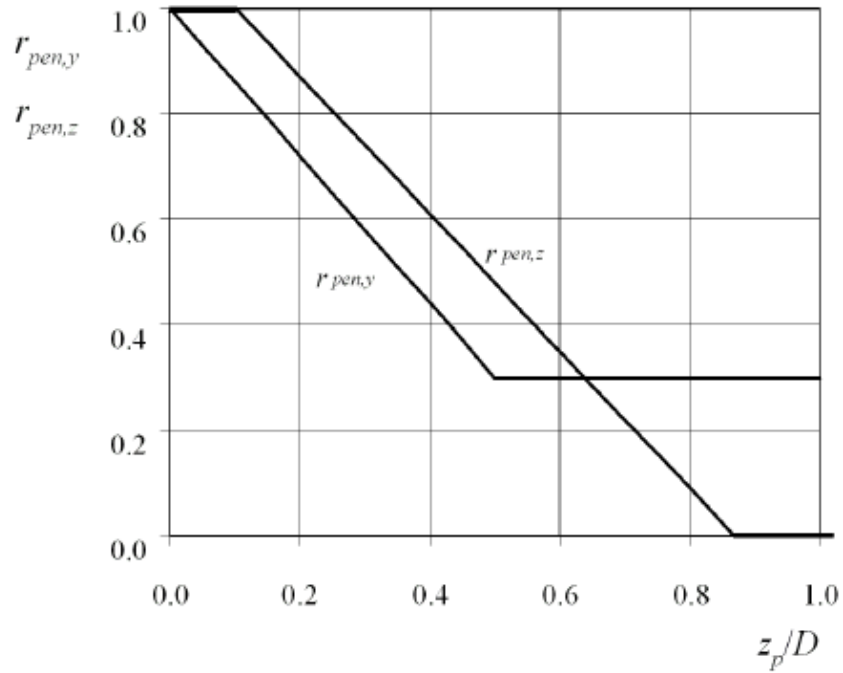
dengan,

z_p = kedalaman penetrasi (pada Gambar 2.5) (m)

D = diameter luar pipa termasuk semua *coating* (m)



Gambar 2.6 Definisi Penetrasi (DNVGL-RP-F109, 2017)



Gambar 2.7 Reduksi Beban Puncak akibat Penetrasi
(DNVGL-RP-F109, 2017)

2.2.6.3 Reduksi beban akibat *trenching*

Faktor reduksi beban akibat *trenching* (Gambar 2.8) baik arah horisontal maupun arah vertikal masing-masing yakni sebagai berikut:

$$r_{tr,y} = 1,0 - 0,18 \cdot (\theta - 5)^{0,25} \cdot \left(\frac{Z_t}{D}\right)^{0,42}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.26)$$

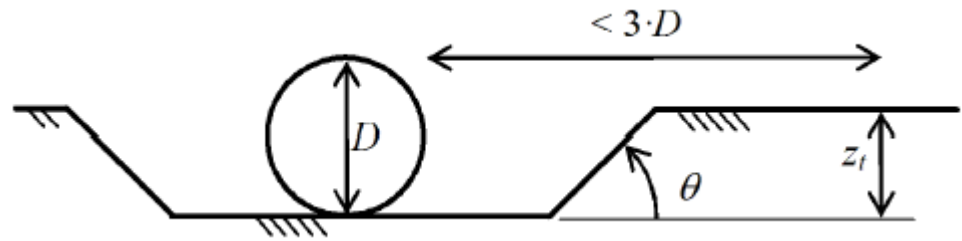
$$r_{tr,z} = 1,0 - 0,14 \cdot (\theta - 5)^{0,43} \cdot \left(\frac{Z_t}{D}\right)^{0,46}, \quad 5 \leq \theta \leq 45 \quad (2.27)$$

dengan,

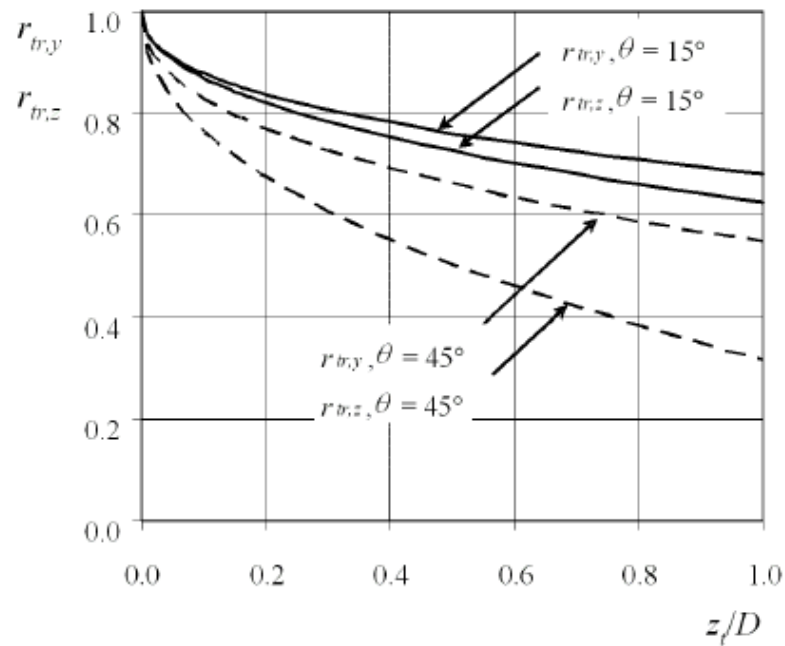
Z_t = kedalaman *trench* (pada Gambar 2.7) (m)

D = diameter luar pipa termasuk semua *coating* (m)

Kedalaman *trench* harus diambil relatif terhadap *seabed* dengan lebar tidak melebihi 3 kali diameter pipa.



Gambar 2.8 Definisi Parameter *Trench* (DNVGL-RP-F109, 2017)



Gambar 2.9 Reduksi Beban Puncak akibat *trenching* (DNVGL-RP-F109, 2017)

2.2.7 On-Bottom Stability

2.2.7.1 Berat Terendam *Pipeline*

Suatu *pipeline* yang berada di bawah laut umumnya tersusun atas lapisan – lapisan yang memiliki jenis material pembentuk dan ketebalan yang berbeda – beda misalnya lapisan tebal dinding pipa, lapisan anti korosi, lapisan concrete. Berat dari setiap lapisan yang ada pada *pipeline* dihitung melalui persamaan berikut:

$$W = A \times \rho \times g \quad (2.28)$$

dengan,

W = Berat lapisan (N/m)

A = Luas penampang lapisan (m^2)

ρ = Densitas material penyusun lapisan (kg/m^3)

g = Percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$)

jika dalam kondisi operasional, maka berat produk / isi juga perlu dihitung menggunakan Persamaan 2.25 dengan memakai diameter dalam pipa untuk mendapatkan nilai A .

Berat keseluruhan ini yang akan digunakan untuk menghitung kestabilan *pipeline* di bawah laut. Berat total didapatkan dengan cara menjumlahkan semua berat tiap lapisan dikurangkan dengan gaya *buoyancy* nya yang dapat dilihat melalui persamaan berikut :

$$b = \rho_{sw} \times g \times D \times \frac{\pi}{4} \quad (2.29)$$

$$w_s = \sum W_{lapisan} - b \quad (2.30)$$

dengan,

b = gaya buoyancy (N/m)

ρ_w = densitas air laut (kg/m^3)

D = diameter total pipa (m)

w_s = berat terendam pipa per satuan panjang (N/m)

2.2.7.2 Kombinasi Pembebanan

Kondisi beban harus merefleksikan kemungkinan respon paling ekstrim yang terjadi pada pipa selama periode desain. Sebelum digunakan untuk menyalurkan minyak dan gas, *pipeline* perlu diinstal di lokasi operasi. Kombinasi beban dibagi menjadi dua kondisi, yaitu sementara dan permanen.

Kondisi sementara adalah kondisi pada saat fase instalasi, ketika pipa kosong. Kondisi sementara dapat dibagi menjadi dua:

- Untuk durasi kurang dari 12 bulan dan lebih dari 3 hari, digunakan periode ulang 10 tahun untuk kondisi aktual lingkungan. Pendekatan untuk kondisi ini adalah menggunakan kondisi paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:
 - Periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 1 tahun arus.

- Periode ulang 1 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.
- Untuk durasi kurang dari 3 hari, kondisi beban ekstrim ditentukan berdasarkan data harian cuaca terpercaya.

Untuk kondisi sementara yang melebihi 12 bulan, digunakan kondisi permanen (operasi). Kondisi operasi permanen menggunakan periode ulang 100 tahun. Pendekatan kondisi permanen menggunakan beban paling ekstrim diantara dua kondisi berikut:

- Periode ulang 100 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.
- Periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 100 tahun arus.

2.2.7.3 Absolute Lateral Static Stability

Metode *Absolute Lateral Static Stability* tidak mengijinkan perpindahan lateral *pipeline* berdasarkan penyamaan gaya yang memastikan gaya tahanan pipa mencukupi untuk menahan beban hidrodinamis maksimum. Agar persyaratan *Absolute Lateral Static Stability* terpenuhi maka harus melihat kriteria berikut :

$$\gamma_{sc} \cdot \frac{F_y^* + \mu \cdot F_z^*}{\mu \cdot w_s + F_R} \leq 1,0 \text{ dan } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z^*}{w_s} \leq 1,0 \quad (2.31)$$

dengan,

γ_{sc} = Safety Factor

F_y^* = beban hidrodinamika arah horisontal (N/m)

F_z^* = beban hidrodinamika arah vertikal (N/m)

μ = koefisien gesekan

w_s = berat terendam pipa per satuan panjang (N/m)

F_R = resistensi tanah pasif (N/m)

Nilai γ_{sc} dalam kondisi badai musim dingin, dapat dilihat pada Tabel 2.2 dan Tabel 2.3.

Tabel 2.2 *Safety Factor*, Badai Musim Dingin di Laut Utara (DNVGL-RP-F109, 2017)

<i>Soil type</i>	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.98	1.32	1.67
Clay	1.00	1.40	1.83

Tabel 2.3 *Safety Factor*, Badai Musim Dingin di Teluk Meksiko dan Laut Selatan (DNVGL-RP-F109, 2017)

<i>Soil type</i>	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.41	1.99
Clay	0.97	1.50	2.16

Sedangkan untuk kondisi siklon maka nilai γ_{sc} dapat dilihat pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5.

Tabel 2.4 *Safety Factor* kondisi siklon di North West Shelf (DNVGL-RP-F109, 2017)

<i>Soil type</i>	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.50	2.16
Clay	0.95	1.56	2.31

Tabel 2.5 *Safety Factor* kondisi siklon di Teluk Meksiko (DNVGL-RP-F109, 2017)

<i>Soil type</i>	<i>Low</i>	<i>Normal</i>	<i>High</i>
Sand and rock	0.95	1.64	2.46
Clay	0.93	1.64	2.54

F_y^* yang merupakan beban horizontal dan F_z^* yang merupakan beban vertikal dapat dicari menggunakan persamaan berikut:

$$F_y^* = r_{tot,y} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_y^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (2.32)$$

$$F_z^* = r_{tot,z} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot D \cdot C_z^* \cdot (U^* + V^*)^2 \quad (2.33)$$

dengan,

F_y^* = beban hidrodinamika arah horisontal (N/m)

F_z^* = beban hidrodinamika arah vertikal (N/m)

r_{tot} = faktor reduksi beban

ρ_w = massa jenis air laut (kg/m^3)

D = diameter luar pipa termasuk semua *coating* (m)

C_y^* = koefisien beban puncak horisontal

C_z^* = koefisien beban puncak vertikal

U^* = *oscillatory velocity amplitude for single design oscillation, perpendicular to pipeline* (Persamaan 2.12)

V^* = *steady current velocity associated with design oscillation, perpendicular to pipeline* (Persamaan 2.14)

Untuk C_y^* arah horizontal dan C_z^* arah vertikal dapat dicari melalui Tabel 2.6 dan Tabel 2.7.

Tabel 2.6 Koefisien Beban Puncak Horisontal (DNVGL-RP-F109, 2017)

C_y^*		K^*										
		2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥ 140
M^*	0.0	13.0	6.80	4.55	3.33	2.72	2.40	2.15	1.95	1.80	1.52	1.30
	0.1	10.7	5.76	3.72	2.72	2.20	1.90	1.71	1.58	1.49	1.33	1.22
	0.2	9.02	5.00	3.15	2.30	1.85	1.58	1.42	1.33	1.27	1.18	1.14
	0.3	7.64	4.32	2.79	2.01	1.63	1.44	1.33	1.26	1.21	1.14	1.09
	0.4	6.63	3.80	2.51	1.78	1.46	1.32	1.25	1.19	1.16	1.10	1.05
	0.6	5.07	3.30	2.27	1.71	1.43	1.34	1.29	1.24	1.18	1.08	1.00
	0.8	4.01	2.70	2.01	1.57	1.44	1.37	1.31	1.24	1.17	1.05	1.00
	1.0	3.25	2.30	1.75	1.49	1.40	1.34	1.27	1.20	1.13	1.01	1.00
	2.0	1.52	1.50	1.45	1.39	1.34	1.20	1.08	1.03	1.00	1.00	1.00
	5.0	1.11	1.10	1.07	1.06	1.04	1.01	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tabel 2.7 Koefisien Beban Puncak Vertikal (DNVGL-RP-F109, 2017)

C_z^*		K^*										
		≤ 2.5	5	10	20	30	40	50	60	70	100	≥ 140
M^*	0.0	5.00	5.00	4.85	3.21	2.55	2.26	2.01	1.81	1.63	1.26	1.05
	0.1	3.87	4.08	4.23	2.87	2.15	1.77	1.55	1.41	1.31	1.11	0.97
	0.2	3.16	3.45	3.74	2.60	1.86	1.45	1.26	1.16	1.09	1.00	0.90
	0.3	3.01	3.25	3.53	2.14	1.52	1.26	1.10	1.01	0.99	0.95	0.90
	0.4	2.87	3.08	3.35	1.82	1.29	1.11	0.98	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.6	2.21	2.36	2.59	1.59	1.20	1.03	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	0.8	1.53	1.61	1.80	1.18	1.05	0.97	0.92	0.90	0.90	0.90	0.90
	1.0	1.05	1.13	1.28	1.12	0.99	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	2.0	0.96	1.03	1.05	1.00	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	5.0	0.91	0.92	0.93	0.91	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
	10	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90

Agar dapat menentukan C_y^* dan $C_{y'}^*$ maka diperlukan nilai K^* dan M^* yang dapat dicari melalui persamaan berikut:

$$K^* = \frac{U^* \cdot T^*}{D} \quad (2.34)$$

$$M^* = \frac{V^*}{U^*} \quad (2.35)$$

dengan,

K^* = Keulegan-Carpenter number for single design oscillation

M^* = Steady to oscillatory velocity ratio for single design oscillation

T^* = single oscillation velocity period (Persamaan 2.13)

2.2.7.4 Stabilitas Vertikal

Untuk menghindari pengapungan di air, berat pipa yang terendam harus memenuhi kriteria berdasarkan persamaan berikut:

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{w_s + b} = \frac{\gamma_w}{S_g} \leq 1,0 \quad (2.36)$$

dengan,

γ_w = *Safety Factor* (= 1,1)

b = *buoyancy* pipa per satuan panjang (N/m)

w_s = berat terendam pipa per satuan panjang (N/m)

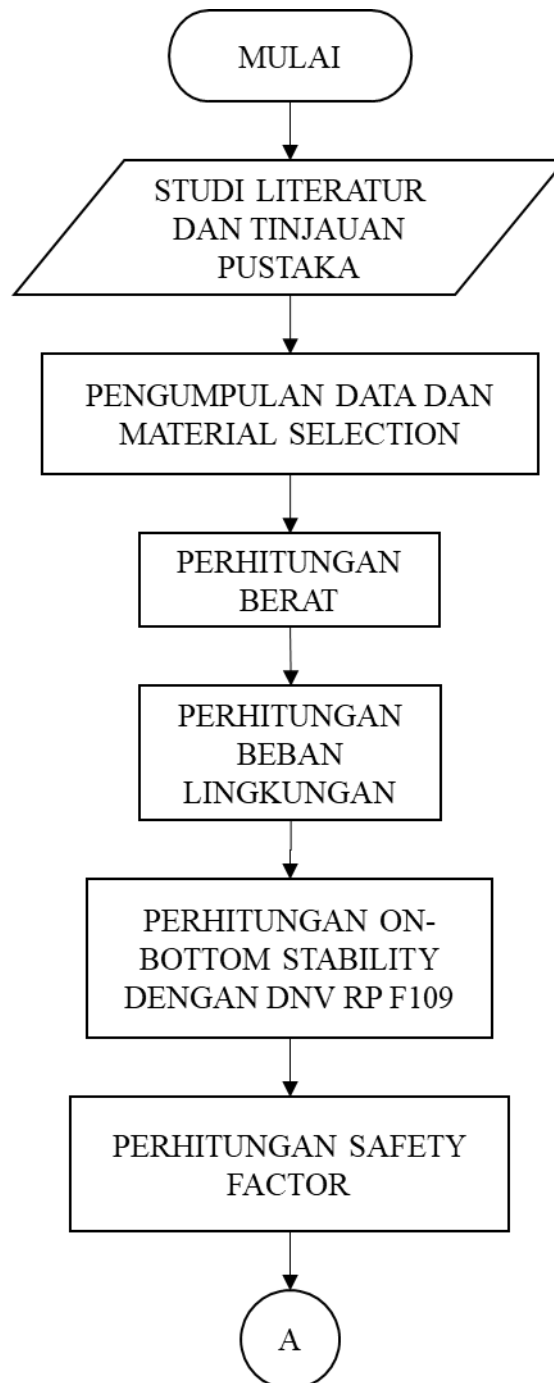
S_g = *Pipe Specific Density* (kg/m³)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir (Flow Chart)

Dalam penelitian ini, penulis menggambarkan langkah-langkah pelaksanaan tugas akhir ini dalam *flow chart* seperti di bawah ini:



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian (lanjutan)

3.2 Penjelasan Diagram Alir

Berdasarkan diagram alir di atas, dapat dijelaskan langkah-langkah dalam penelitian pada tugas akhir di bawah ini:

1. Studi Literatur dan Tinjauan Pustaka

Pada tahap ini penulis melakukan pencarian sumber informasi dan referensi. Hal ini dilakukan sebagai bahan pendukung pada tugas akhir ini. Adapun sumber referensi dan informasi yang penulis dapatkan dari berbagai jurnal nasional maupun internasional, buku, beberapa Tugas Akhir maupun Thesis yang sudah pernah ada sebelumnya, dan berbagai referensi dari internet.

2. Pengumpulan Data

Pada tahap ini penulis mengumpulkan data serta memilih material pipa yang akan digunakan, dimana data lingkungan yang didapat merupakan data lapangan yang sudah diukur, sehingga pada Tugas Akhir ini akan dilakukan perhitungan dari data – data tersebut. Data yang didapat berlokasi di daerah Selat Makassar dan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Tabel Data Pipa

Design Data				
(Pipe Mode, Clay Soil)				
No	<i>Pipeline Data</i>			
1	Pipe Direction	θ	90	Deg
2	Outer Steel Diameter	OD	355,600	mm
3	Concrete Thickness	tconcrete	40	mm
4	Water Density	ρ_{water}	1025	kg/m ³
5	Steel Density	ρ_{steel}	7850	kg/m ³
6	Concrete Density	ρ_{concrete}	3040	kg/m ³
7	Content Density	ρ_{content}	213	kg/m ³
8	Gravitation	G	9,81	m/s ²
	Soil Interaction			
9	Soil	Clay		
10	Bottom Roughness	zo	$3,25 \times 10^{-6}$	m
11	Seabed Grain Size	d50	0,0039	mm
12	Dry Unit Soil Weight	γ_s	18000	N/m ³
13	Undrained Shear Strength	Su	2	N/m ³
	Environmental Parameter			
14	Reference Current Height	Zr	3	m
15	Peak Enhancement Factor	γ	1	
	Wave And Current Data	1 year	10 year	100 year
16	Hs(m)	2,75	3,39	3,97
17	Tp(s)	8,7	9,7	10,5
18	Uc(m/s)	0,7	0,83	0,95
	Case		Depth(m)	Thickness(mm)
19	Case 1		1426	22,2
20	Case 2		100	22,2

3. Perhitungan Berat

Pada tahap ini penulis akan melakukan perhitungan berat pipa meliputi berat baja di udara, berat selimut beton (concrete) diudara, berat isi pipa dan besar gaya apung yang selanjutnya akan dicari berapa nilai berat terendam pipa.

4. Perhitungan Beban Lingkungan

Pada tahap ini penulis akan melakukan perhitungan untuk mendapatkan kecepatan gelombang, arus, dan tahanan tanah yang bekerja pada pipa. Perhitungan kecepatan partikel air akibat gelombang di dasar laut menggunakan spektrum JONSWAP yang merupakan distribusi energi di permukaan laut, kemudian ditransfer menjadi kecepatan partikel air didasar laut menggunakan transfer function. Perhitungan koefisien gesek tanah yang disesuaikan dengan tipe tanah pada seabed.

5. Perhitungan On-Bottom Stability dengan DNVGL RP F109

Pada tahap ini penulis akan menghitung stabilitas pipa akibat dari beban lingkungan yang terjadi di lokasi tempat pipa dioperasikan sesuai dengan aturan yang diterapkan oleh DNVGL RP F109. Stabilitas tersebut mencakup aspek tentang berat pipa terpendam dan gaya hidrodinamis.

6. Perhitungan *Safety Factor*

Pada tahap ini penulis akan menghitung *Safety Factor* dari hasil perhitungan pada tahap sebelumnya. *Safety Factor* merupakan parameter yang digunakan untuk melihat tingkat keamanan dari *pipeline* di bawah laut dan mengetahui apakah tebal lapisan konkret yang ditambahkan sudah cukup memenuhi agar *pipeline* tetap stabil.

7. Analisis Hasil dan Pembahasan

Pada tahap ini penulis akan menyajikan hasil analisis on-bottom stability dalam bentuk tabel dan grafik serta dilakukan pembahasan terhadap hasil analisis yang didapat.

8. Kesimpulan dan Saran

Pada tahap ini penulis akan menarik kesimpulan sehingga diperoleh informasi yang dapat bermanfaat serta pemberian saran untuk penelitian selanjutnya.

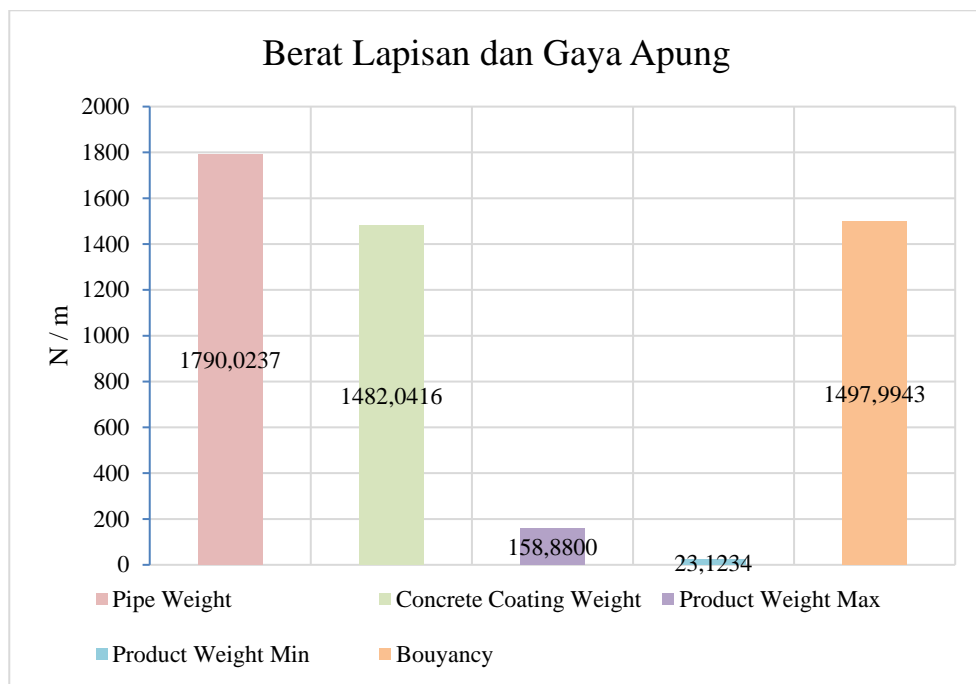
BAB IV

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Stabilitas Vertikal

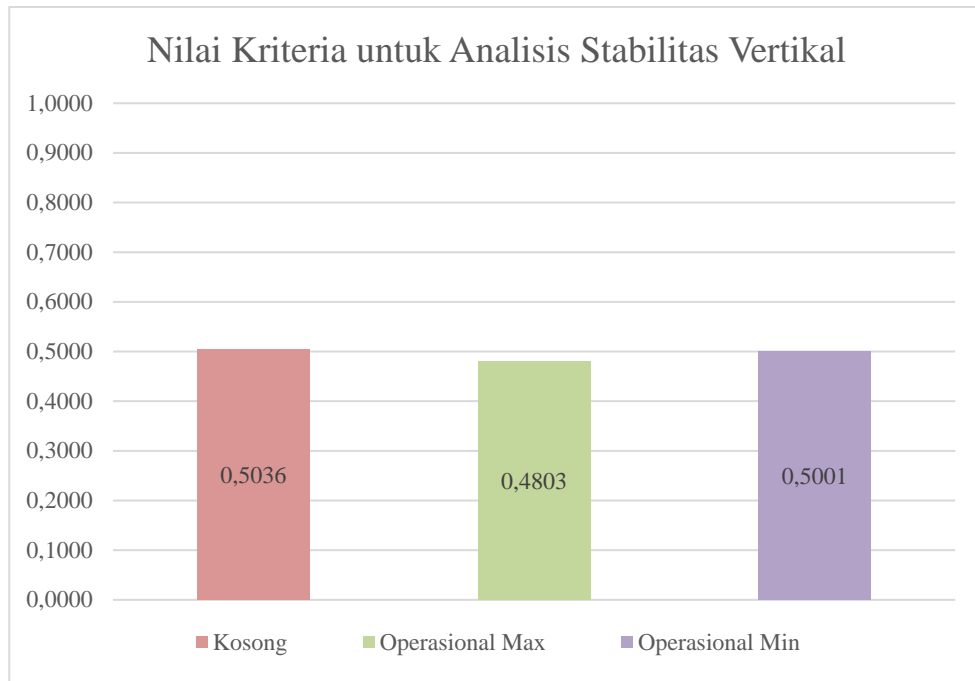
Dalam analisis *On-Bottom Stability*, terdapat analisis stabilitas vertikal yang berhubungan dengan berat pipa yang terendam dalam air. Perhitungan ini ditujukan untuk menghindari gaya hidrodinamis ke atas yang bisa menyebabkan pipa tidak stabil pada di arah vertikal. Perhitungan berat pipa yang terendam dapat dilihat pada Lampiran A bagian A.1.1. Agar tercapai stabilitas vertikal pada pipa, berat pipa yang terendam harus memenuhi kriteria berdasarkan Persamaan 2.36.

Setelah dilakukan perhitungan menggunakan data dari *Case 1* dan *Case 2* didapatkan berat untuk setiap lapisan dan gaya apung pipa yang terdapat pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik Berat Lapisan dan Gaya Apung Pipa *Case 1* dan *Case 2*
Perhitungan stabilitas vertikal diatas selanjutnya dipakai untuk perhitungan selanjutnya pada saat kondisi kosong, kondisi operasional max, dan kondisi operasional min, dimana pada kondisi kosong berat dari produk tidak dimasukkan dalam perhitungan.

Dari hasil perhitungan pada Lampiran A bagian B.1.6., didapatkan berat pipa yang terendam dalam air sebesar 1774,0710 N/m pada saat kondisi kosong, 1932,9510 N/m pada saat kondisi operasional max, dan 1797,1944 N/m pada saat kondisi operasional min. Hasil perhitungan nilai kriteria pada Lampiran A bagian C.1. untuk setiap kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.2.



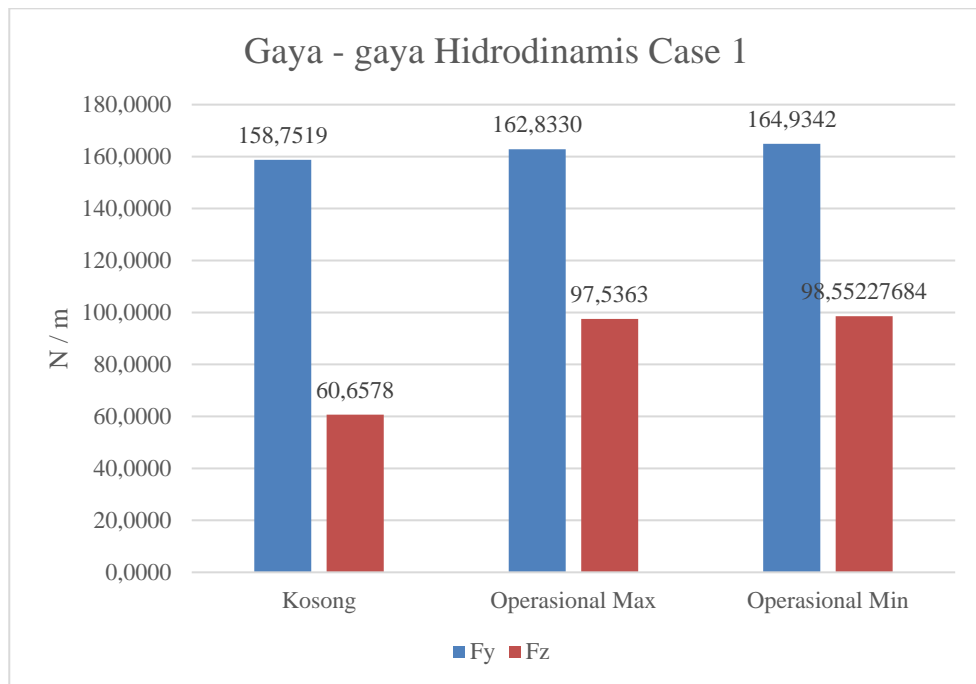
Gambar 4.2 Grafik Nilai Kriteria untuk Analisis Stabilitas Vertikal

Pipa dikatakan memenuhi kriteria stabilitas vertikal jika nilai kriterianya kurang dari atau sama dengan (\leq) 1. Untuk *Case 1* dan *Case 2*, nilai kriteria pada saat kondisi kosong sebesar 0,5036; pada saat kondisi operasional max sebesar 0,4803; dan pada saat kondisi operasional min sebesar 0,5001; hal ini menunjukkan bahwa *Case 1* dan *Case 2* memenuhi kriteria stabilitas vertikal.

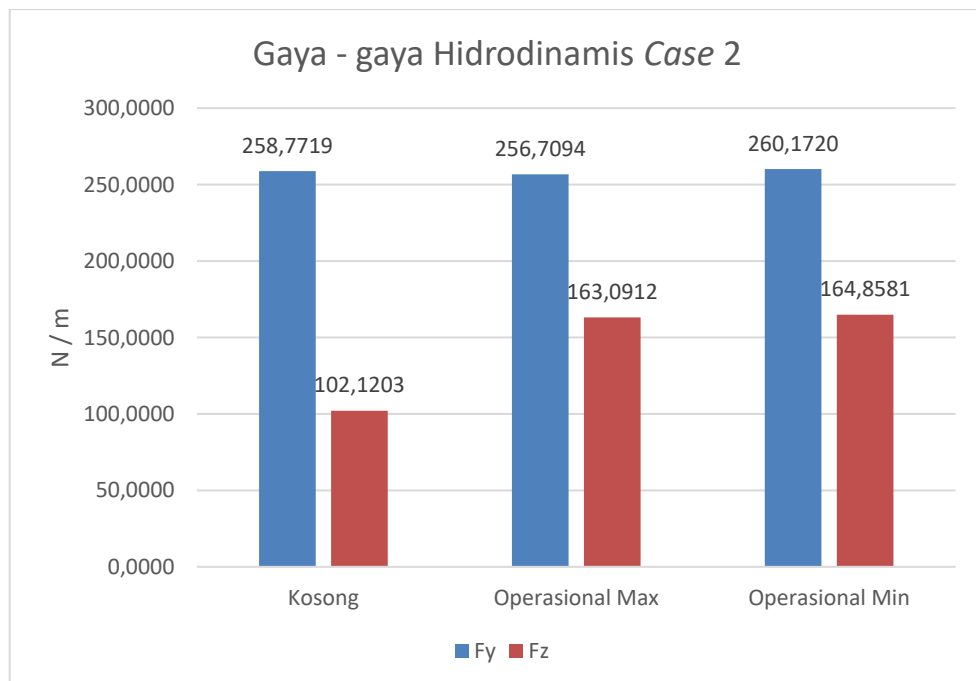
4.2 Analisis Stabilitas Lateral

Selain analisis stabilitas vertikal, juga terdapat analisis stabilitas lateral yang berhubungan dengan gaya – gaya hidrodinamis yang bekerja pada pipa. Perhitungan gaya beban hidrodinamika arah horizontal (F_y) dapat dilihat pada Lampiran A bagian B.4.6., sedangkan gaya beban hidrodinamika arah vertikal (F_z) pada Lampiran A bagian B.4.7. Agar persyaratan stabilitas lateral terpenuhi maka

harus melihat kriteria pada Persamaan 2.31. Gaya – gaya hidrodinamika yang bekerja pada pipa di setiap kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Gambar 4.4.



Gambar 4.3 Grafik Gaya – Gaya Hidrodinamis pada *Case 1*

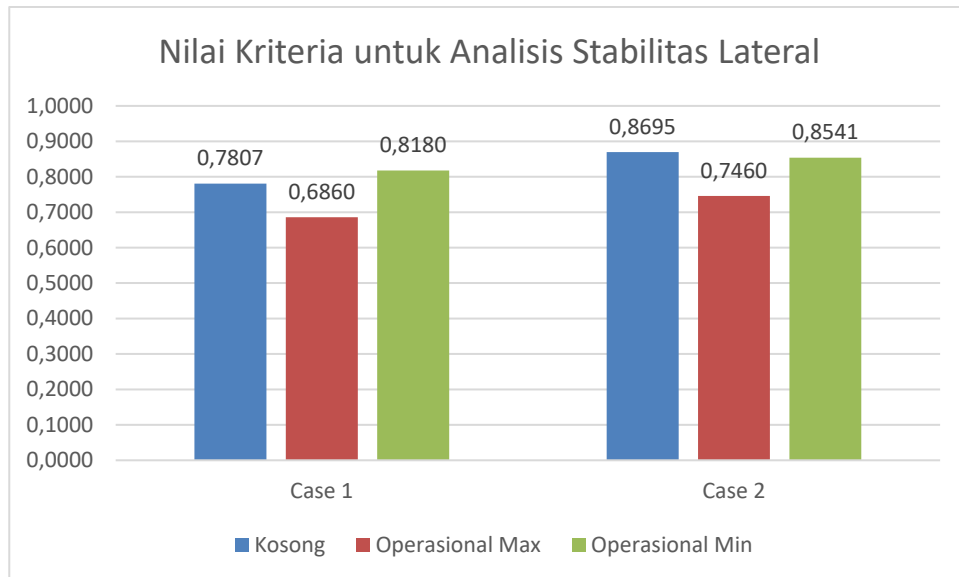


Gambar 4.4 Grafik Gaya – Gaya Hidrodinamis pada *Case 2*

Dalam perhitungan pada kondisi kosong data lingkungan yang digunakan adalah periode ulang 10 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 1 tahun arus. Untuk kondisi operasional data lingkungan yang digunakan adalah

Periode ulang 100 tahun gelombang dikombinasikan dengan periode ulang 10 tahun arus.

Untuk perhitungan kriteria stabilitas lateral dapat dilihat pada Lampiran A bagian C.2. Hasil perhitungan untuk kriteria stabilitas lateral untuk setiap *case* pada setiap kondisi dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Grafik Nilai Kriteria untuk Analisis Stabilitas Lateral

Dapat dilihat dari hasil tersebut bahwa nilai kriteria untuk *Case 1* baik kondisi kosong sebesar 0,7807, operasional max sebesar 0,6860, maupun operasional min sebesar 0,8180 memenuhi kriteria stabilitas lateral. Begitu juga pada *Case 2*, pada ketiga kondisi memenuhi kriteria stabilitas lateral.

4.3 Analisis *Safety Factor*

Safety Factor merupakan bentuk lain dari nilai kriteria stabilitas. Rumus yang dipakai merupakan rumus dari kriteria stabilitas yang dimodifikasi untuk mencari nilai berat terendam minimum. Setelah mendapatkan berat terendam minimum, berat pipa yang terendam aktual akan dibandingkan dengan hasil tersebut.

Nilai dari *Safety Factor* harus lebih besar dari atau sama dengan (\geq) 1 agar dapat dikatakan aman. Jika *Safety Factor* bernilai kurang dari ($<$) 1, maka perlu dilakukan penambahan tebal concrete.

Perhitungan *Safety Factor* dapat dilihat pada Lampiran A bagian D, didapatkan hasil perhitungan yang dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Perhitungan *Safety Factor Case 1*

Vertikal	Ws Aktual (N/m)	Ws Minimum (N/m)	<i>Safety Factor</i>	
Kosong	1774,6770	149,7994	11,8430	Aman
Operasional Max	1932,9510	149,7994	12,9036	Aman
Operasional Min	1797,1944	149,7994	11,9973	Aman
Lateral	Ws Aktual (N/m)	Ws Minimum (N/m)	Safety Factor	
Kosong	1774,6770	1128,7507	1,5717	Aman
Operasional Max	1932,9510	839,5442	2,1131	Aman
Operasional Min	1797,1944	1237,8273	1,4332	Aman

Tabel 4.2 Perhitungan *Safety Factor Case 2*

Vertikal	Ws Aktual (N/m)	Ws Minimum (N/m)	Safety Factor	
Kosong	1774,6770	149,7994	11,8430	Aman
Operasional Max	1932,9510	149,7994	12,9036	Aman
Operasional Min	1797,1944	149,7994	11,9973	Aman
Lateral	Ws Aktual (N/m)	Ws Minimum (N/m)	Safety Factor	
Kosong	1774,6770	1381,8254	1,2839	Aman
Operasional Max	1932,9510	993,8035	1,7851	Aman
Operasional Min	1797,1944	1332,7054	1,3312	Aman

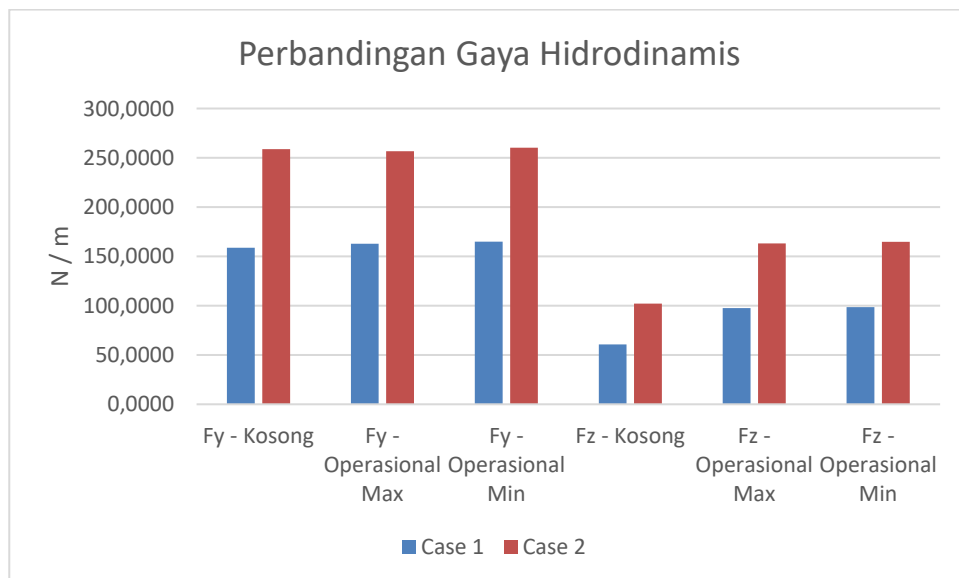
Dapat dilihat pada tabel tersebut pada semua kondisi dalam perhitungan stabilitas vertikal memiliki nilai *Safety Factor* yang lebih besar dari 1. Jika dilihat pada bagian stabilitas lateral nilai *Safety Factor* tidak terlampaui jauh tetapi masih lebih besar dari 1 pada semua kondisi. Oleh karena itu untuk *Case 1* dan *Case 2* pipa tersebut dapat dikatakan stabil baik kondisi kosong, operasional max, maupun operasional min dalam stabilitas vertikal dan lateral.

4.4 Analisis Perbandingan Kedalaman

Setelah didapatkan hasil analisis stabilitas vertikal maupun lateral dan *safety factor* berikutnya akan dilakukan perbandingan antara hasil dari *Case 1* dan *Case 2*. *Case 1* menggunakan kedalaman sebesar 1426 m, sedangkan *Case 2* menggunakan kedalaman sebesar 100 m. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan kedalaman terhadap tebal *concrete* dan *Safety Factor pipeline* tersebut.

Masing – masing *Case* yang ada memiliki tebal *concrete* yang sama yaitu 40 mm. Dapat dilihat melalui Gambar 4.2 dan Gambar 4.5 bahwa penggunaan tebal *concrete* sebesar 40 mm pada kedua *Case* sudah memenuhi nilai kriteria. Dari sini, jika dibandingkan antara *Case 1* dan *Case 2* tidak terdapat perbedaan ketebalan *concrete*.

Berikutnya dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, terlihat bahwa terdapat perbedaan antara *Safety Factor* pada *Case 1* dan *Case 2*. Jika dibandingkan, nilai *Safety Factor* dari *Case 1* memiliki nilai yang lebih besar daripada *Case 2*. Hal ini disebabkan oleh gaya hidrodinamis horizontal (F_y) maupun vertikal (F_z) yang cenderung lebih kecil pada laut dalam yang dapat dilihat pada Gambar 4.6.



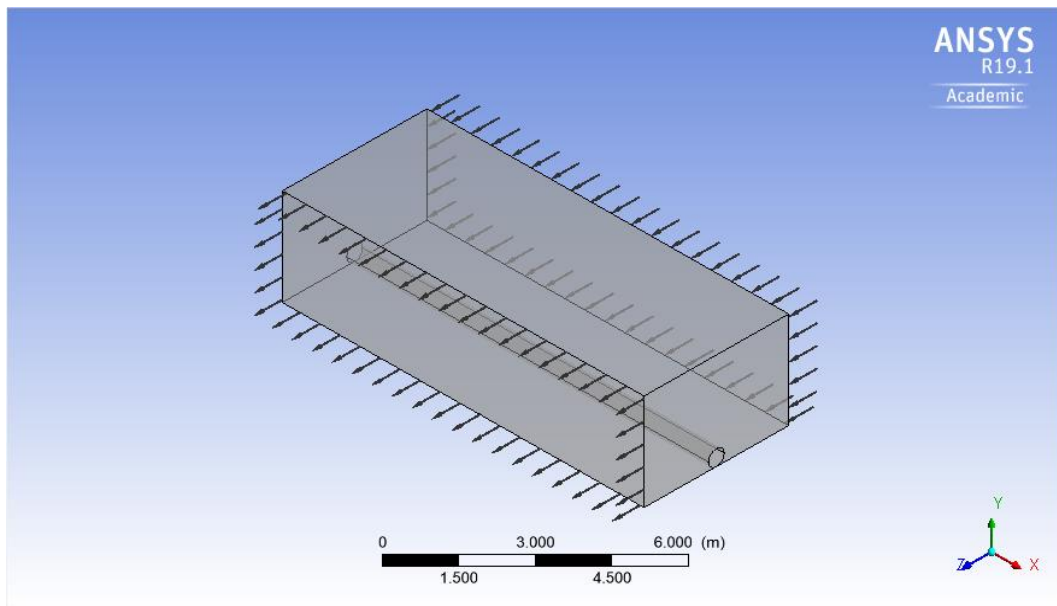
Gambar 4.6 Grafik Perbandingan Gaya Hidrodinamis

Laut dalam memiliki gaya - gaya hidrodinamis yang cenderung kecil dikarenakan kecepatan arus yang juga lebih tenang daripada kedalaman yang lebih

dekat dengan permukaan laut. Oleh karena itu, *Case 1* pada kedalaman 1426 m lebih stabil dan *safety* daripada *Case 2*.

4.5 Permodelan Menggunakan ANSYS CFX

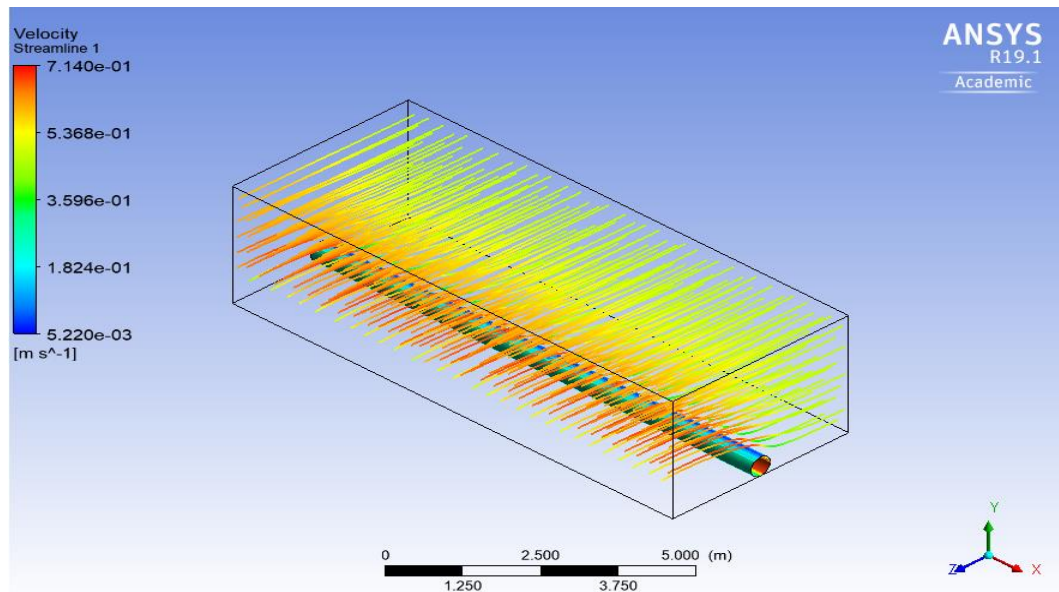
Pemodelan *pipeline* dilakukan pada *software* ANSYS CFX dengan menggunakan data dari *Case 1* kondisi kosong. Pipa bawah laut dimodelkan sepanjang 10 meter di dalam ANSYS CFX dengan diameter yang telah diketahui yakni 0,4356 meter. Model pipeline dapat dilihat pada Gambar 4.7 dan Gambar 4.8.



Gambar 4.7 Model Pipeline *Case 1* di ANSYS CFX

Pada ANSYS CFX, bagian atas, kiri, dan kanan diasumsikan sebagai dinding *Free Slip Wall*, sedangkan tanah dimodelkan sebagai *No Slip Wall* yang memiliki kekasaran sebesar $3,25 \times 10^{-6}$ m, letaknya berada dibawah pipa. Karena model *pipeline* homogen (memiliki diameter yang sama) maka *meshing* diasumsikan *default* hal ini sudah akan teroptimasikan oleh ANSYS CFX.

Tujuan dari pemodelan ANSYS CFX yakni untuk mengetahui besar gaya arah horisontal dan vertikal pada pipa bawah laut. Hasil simulasi ANSYS CFX dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil Simulasi Pipeline *Case 1* di ANSYS CFX

Dari hasil simulasi pemodelan dengan menggunakan ANSYS CFX, dapat diketahui besar gaya horisontal (F_y) dan gaya vertikal (F_z). Besar gaya horisontal (F_y) dan gaya vertikal (F_z) dapat dilihat pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Nilai Gaya dari ANSYS CFX

Parameter		ANSYS	Satuan
Gaya Horisontal	F_y	151,759	N/m
Gaya Vertikal	F_z	65,8693	N/m

Setelah mendapatkan nilai gaya dari simulasi ANSYS CFX, langkah berikutnya yakni mencari besar *error* perhitungan ANSYS CFX dan perhitungan manual. Hasil nilai *error* dapat dilihat pada Tabel 4.4:

Tabel 4.4 Nilai Error perhitungan ANSYS CFX dan manual

	ANSYS CFX	Manual	Error
Nilai Kriteria	0,7537	0,7807	3%

Dapat dilihat dari hasil Tabel 4.4, hasil perhitungan ANSYS CFX dan manual menunjukkan angka 3% yang berarti *error* masih dapat diterima dan hasil dari perhitungan manual dapat digunakan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari serangkaian analisis hasil dan pembahasan *on-bottom stability pipeline* yang telah dilakukan dalam penelitian tugas akhir ini, dapat diambil kesimpulan pada permasalahan yang diangkat. Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut :

1. Gaya hidrodinamis vertikal dan gaya hidrodinamis horizontal yang bekerja pada *pipeline* untuk *Case 1* berdasarkan DNVGL RP F109 masing – masing adalah 158,7042 N/m dan 60,6686 N/m pada kondisi kosong; 162,8330 N/m; dan 97,5363 N/m pada kondisi operasional max; 164,7555 N/m dan 98,6124 N/m pada kondisi operasional min. Besar gaya apung, gaya hidrodinamis vertikal, dan gaya hidrodinamis horizontal yang bekerja pada *pipeline* untuk *Case 2* berdasarkan DNVGL RP F109 masing – masing adalah 258,7719 N/m dan 102,1203 N/m pada kondisi kosong; 256,7094 N/m dan 163,0912 N/m pada kondisi operasional max; 260,1720 N/m dan 164,8581 N/m pada kondisi operasional min.
2. Berdasarkan kriteria stabilitas lateral dari DNVGL RP F109, hasil analisis *On-Bottom Stability* dari *pipeline* proyek menunjukkan bahwa *pipeline* tersebut stabil pada kedalaman 1426 m yaitu dengan 0,7807 untuk kondisi kosong; 0,6860 untuk kondisi operasional max; dan 0,8180 untuk kondisi operasional min. Begitu juga pada kedalaman 100 m dengan 0,8695 untuk kondisi kosong; 0,7460 untuk kondisi operasional max; dan 0,8541 untuk kondisi operasional min. Kedua *Case* menggunakan tebal *concrete* 40 mm.
3. Dalam proyek ini, penambahan kedalaman dari 100 m menuju 1426 m tidak menimbulkan penambahan tebal *concrete*, tetap 40 mm. Safety Factor pada *pipeline* di laut yang lebih dalam memberikan nilai yang lebih besar yaitu 1,5709 untuk kondisi kosong; 2,1131 untuk kondisi operasional max; dan 1,4307 untuk kondisi operasional min daripada laut yang lebih dangkal yaitu 1,2839 untuk kondisi kosong; 1,7851 untuk kondisi operasional max; dan 1,3312 untuk kondisi operasional min.

5.2 Saran

Saran yang diperlukan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Melakukan mitigasi seperti penambahan tebal *concrete*, penggantian material *pipeline*, penggunaan peralatan support, dll apabila kriteria tidak terpenuhi.
2. Diperlukan analisis *pipeline* yang lain seperti analisis *free span*, *Fatigue limit*, *Expansion Thermal*, *VIV*, *On Bottom Roughness*, *Pipe Walking*, *Buckling*, dll dengan menggunakan data dari studi kasus ini.
3. Melakukan analisis biaya berdasarkan hasil analisis *On Bottom Stability*.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, D.W., Lammert, W.F., Hale, J.R., dan Jacobsen V. 1989. Submarine *pipeline* on-bottom stability: recent AGA research. **Proceeding, The 10th Offshore Technical Conference**, paper 6055.
- Bai, Y., Bai, Q. 2005. **Subsea Pipelines and Risers**. Elsevier Science, USA.
- Brennodden, H., Sveggen, O., Wagner, D.A., dan Murff, J.D. 1986. Full-scale pipe-soil interaction tests. **Proceeding, Offshore Technology Conference, OTC 5338, 433-440**.
- Det Norske Veritas Offshore Standard F101. 2012. **Recommended Practices for Submarine Pipelines System**. Det Norske Veritas, Norway.
- Det Norske Veritas Recommended Practices F105. 2006. **Recommended Practices for freespanning pipelines**. Det Norske Veritas, Norway.
- Det Norske Veritas Germanischer Lloyd Recommended Practices F109. 2017. **Recommended Practices for On-Bottom Stability Design of Submarine Pipelines**. Det Norske Veritas, Norway.
- Det Norske Veritas Germanischer Lloyd Recommended Practices F114. 2017. **Recommended Practices for Pipe-Soil Interaction for Submarine Pipelines**. Det Norske Veritas, Norway.
- Djarmiko, E.B. 2012. **Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di Atas Gelombang Acak**. ITS Press : Surabaya.
- Foda, M.A., Chang, J., Law, A. 1990. Wave-induced breakout of half-buried marine pipes. **Journal of Waterways, Port, Coastal and Ocean Engineering**. 116:267-286.
- Ghebregiorghis, D.A. 2014. **On-Bottom Stability Analysis of Subsea Pipelines According to DNV-RP-F109**. Laporan Tugas akhir. UiS, Norwegia.
- Guo, Boyun, Song, S., Chacko, J., dan Ghalambor, A. 2005. **Offshore Pipelines**. Gulf Professional Publishing, Burlington, USA.
- Herbich, J.B. 1985. Hydromechanics of submarine *pipelines*: Design problems. **Canadian Journal of Civil Engineering**. 12:863-874.
- Jeng, D.S., Ismail, A., Zhang L.L., dan Zhang J.S. 2013. Empirical model for the prediction of lateral stability coefficient for un-trenched submarine pipes

- based on self-evolving neural network (SEANN). **Ocean Engineering**. 72:167-175.
- Lambrakos, K.F., Remseth, S., Sotberg, T. and Verley, R. 1987. Generalized Response of Marine *Pipelines*. **Proceeding of Nineteenth Offshore Technology Conference**, Houston. Paper No. 5507.
- Lawlor, C.D.F., Flynn, S.J.A. 1991. Subsea *pipeline* stability analysis: Still a black art?. **Proceeding, Ninth Australasian Conference on Coastal and Ocean Engineering**, Australia, 1989: 35-41.
- Liu, H. 2003. **Pipeline Engineering**. Lewis Publisher
- Mousselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis and Method**. Pennwell Oklahoma.
- Munari, M. Gantina, R. Ibrahim, H. Idris, K. Fahrozi, T. 2007. “On Bottom Stability Analysis of Partially Buried *Pipeline* at Near – Shore South Sumatera – West Java *Pipeline*”. **Journal of the Indonesia Oil and Gas Community**. Vol 3 : 46-52.
- Ridlwani A., I. Rochani, H. Ikhwan. 2017. Analisis On-Bottom Stability Offshore Pipeline pada kondisi operasi:: Studi Kasus Platform SP menuju Platform B1C/B2C PT. Pertamina Hulu Energi Offshore North West Java. *Jurnal Teknik ITS* 6 (2), G189 – G193.
- Sibuea, C., Y. Mulyadi, I. Rochani. 2017. Analisis On-Bottom Stability dan Local Buckling: Studi Kasus Pipa Bawah Laut dari Platform ULA menuju Platform UW. *Jurnal Teknik ITS* 5 (2)
- Soegiono. 2007. **Pipa Laut**. Airlangga University Press : Surabaya.
- Teh, T., Palmer, A., Bolton, M., dan Damgaard, J. 2006. Stability of Submarine *Pipelines* on Liquefied Seabeds. **Journal of Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.** 132: 244–251.
- Tian, Y., Youssef, B., Cassidy, M.J. 2015. Assessment of *pipeline* stability in the Gulf of Mexico during hurricanes using dynamic analysis. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**.
- Verley, R., Lambrakos, K.F., dan Reed, K. 1987. Prediction of Hydrodynamic Forces on Seabed *Pipelines*. **Proceeding, Nineteenth Offshore Technology Conference**, Houston. Paper No. 5503.

- Verley, R. dan Sotberg, T. 1992. A Soil Resistance Model for *Pipelines* Placed on Sandy Soils. **OMAE**. Volume 5-A.
- Wagner, D.A., Murff, J.D., Brennodden, H., Sveggen, O. 1987. Pipe-soil interaction model. **The 8th Offshore Technical Conference**. Paper 5504.

LAMPIRAN A

Perhitungan *On-Bottom Stability*

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 1

CONDITION : Empty (1th Current + 10th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.39 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 9.7 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 1426 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m}$ above seabed
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.356 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=0\frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw}\cdot g\cdot Dtot^2\cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=998.293\frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$Wsv:=\left(Wp+Wcon+Wf-b\right)$$

$$Wsv=791.731\frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$dref:=99\text{ m}$$

$$Ur:=Uref\cdot \left(\frac{d-dr}{d-dref}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.651\frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.632 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.257 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.127 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 2.107 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l|l} \text{if } \gamma = 1 & \\ \parallel & 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 & \\ \parallel & 1.21 \\ \text{else} & \\ \parallel & 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.127 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.035 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.071 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.312$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.898$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.02 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.922$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.058$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.922$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.74$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 1.023$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 8.903$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \begin{cases} \text{if } K_s \leq 26.7 \\ \left(5 \cdot K_s - 0.15 \cdot K_s^2 \right) \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} \\ \text{else} \\ K_s \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \frac{4.1 \cdot Su \cdot D_{tot}}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 104.258 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$C_y = 1.912$$

Dari Tabel didapat kan :

$$C_z = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 158.733 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 60.658 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 503.897 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \begin{cases} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{cases} = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 1.571$$

$$SF = 1.571$$

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 1

CONDITION : Operation Max (10th Current + 100th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 213 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.97 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 10.5 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 1426 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m above seabed}$
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.356 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=158.88\frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw}\cdot g\cdot Dtot^2\cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=998.293\frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$Wsv:=(Wp+Wcon+Wf-b)$$

$$Wsv=950.611\frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$dref:=99\text{ m}$$

$$Ur:=Uref\cdot \left(\frac{d-dr}{d-dref}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.772\frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.749 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.257 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.423 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 1.992 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l} \text{if } \gamma = 1 \\ \quad \parallel 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 \\ \quad \parallel 1.21 \\ \text{else} \\ \quad \parallel 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.423 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.073 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.147 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.312$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.748$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.023 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.908$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.045$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.908$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.732$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 2.248$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 5.082$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \begin{cases} \text{if } Ks \leq 26.7 \\ \left(5 \cdot Ks - 0.15 \cdot Ks^2 \right) \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \\ \text{else} \\ Ks \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \frac{4.1 \cdot Su \cdot Dtot}{Gc^{0.39}} \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 128.837 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$Cy = 1.223$$

Dari Tabel didapat kan :

$$Cz = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 162.833 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 97.536 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 449.856 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \left. \begin{array}{l} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{array} \right| = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 2.113$$

$$SF = 2.113$$

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 1

CONDITION : Operation Min (10th Current + 100th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.97 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 10.5 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 1426 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m above seabed}$
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.356 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 0 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=23.123 \frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw} \cdot g \cdot D_{tot}^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=998.293 \frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$W_{sv}:=\left(Wp+W_{con}+Wf-b\right)$$

$$W_{sv}=814.854 \frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$d_{ref}:=99 \text{ m}$$

$$Ur:=U_{ref} \cdot \left(\frac{d-dr}{d-d_{ref}} \right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.772 \frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.749 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.257 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.423 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 1.992 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l|l} \text{if } \gamma = 1 & \\ \parallel & 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 & \\ \parallel & 1.21 \\ \text{else} & \\ \parallel & 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.423 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.073 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.147 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.312$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.873$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.02 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.92$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.056$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.92$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.739$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 2.248$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 5.082$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \begin{cases} \text{if } Ks \leq 26.7 \\ \left(5 \cdot Ks - 0.15 \cdot Ks^2 \right) \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \\ \text{else} \\ Ks \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \frac{4.1 \cdot Su \cdot Dtot}{Gc^{0.39}} \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 107.664 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$Cy = 1.223$$

Dari Tabel didapat kan :

$$Cz = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 164.934 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 98.552 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 569.549 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \left. \begin{array}{l} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{array} \right| = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 1.431$$

$$SF = 1.431$$

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 2

CONDITION : Empty (1th Current + 10th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.39 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 9.7 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 100 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m}$ above seabed
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.386 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 520.644 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=0\frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw}\cdot g\cdot Dtot^2\cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=(1.174\cdot 10^3)\frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$Wsv:=(Wp+Wcon+Wf-b)$$

$$Wsv=(1.137\cdot 10^3)\frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$dref:=99\text{ m}$$

$$Ur:=Uref\cdot \left(\frac{d-dr}{d-dref}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.819\frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.799 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.193 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.127 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 2.107 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l|l} \text{if } \gamma = 1 & \\ \parallel & 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 & \\ \parallel & 1.21 \\ \text{else} & \\ \parallel & 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.127 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.041 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.084 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.288$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.678$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.027 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.902$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.039$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.902$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.727$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 1.119$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 9.496$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \quad \begin{cases} \text{if } K_s \leq 26.7 \\ \quad \left(5 \cdot K_s - 0.15 \cdot K_s^2 \right) \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} \\ \quad \text{else} \\ \quad K_s \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \quad \frac{4.1 \cdot Su \cdot D_{tot}}{G_c^{0.39}} \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 157.94 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$C_y = 1.859$$

Dari Tabel didapat kan :

$$C_z = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 258.763 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 102.117 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 885.422 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \left. \begin{array}{l} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{array} \right| = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 1.284$$

$$SF = 1.284$$

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 2

CONDITION : Operation Min (10th Current + 100th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 213 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.97 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 10.5 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 100 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m}$ above seabed
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.39 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 593.247 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=158.88\frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw}\cdot g\cdot Dtot^2\cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=(1.198\cdot 10^3)\frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$Wsv:=(Wp+Wcon+Wf-b)$$

$$Wsv=(1.344\cdot 10^3)\frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$dref:=99\text{ m}$$

$$Ur:=Uref\cdot \left(\frac{d-dr}{d-dref}\right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.971\frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.949 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.193 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.423 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 1.992 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l|l} \text{if } \gamma = 1 & \\ \parallel & 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 & \\ \parallel & 1.21 \\ \text{else} & \\ \parallel & 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.423 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.084 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.17 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.285$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.58$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.032 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.885$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.023$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.885$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.716$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 2.372$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 5.567$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \quad \begin{cases} \text{if } Ks \leq 26.7 \\ \quad \left(5 \cdot Ks - 0.15 \cdot Ks^2 \right) \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \\ \quad \text{else} \\ \quad Ks \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \quad \frac{4.1 \cdot Su \cdot Dtot}{Gc^{0.39}} \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 196.635 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$Cy = 1.159$$

Dari Tabel didapat kan :

$$Cz = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 256.7 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 163.086 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 752.731 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \left. \begin{array}{l} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{array} \right| = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 1.785$$

$$SF = 1.785$$

ON BOTTOM STABILITY ANALYSIS

DNV-GL RP F109

Design By: Kevin Mirekel Hamzah

DESIGNER : Kevin Mirekel Hamzah

PROJECT : Final Project

CASE : 2

CONDITION : Operation Min (10th Current + 100th Wave)

A. Input Data

1. Pipe Data	<i>OutsideDiameter</i>	$OD := 355.6 \text{ mm}$
	<i>WallThickness</i>	$t := 22.2 \text{ mm}$
	<i>CorrosionAllowance</i>	$t_{call} := 0 \text{ mm}$
	<i>ConcreteCoatingThickness</i> (trial)	$t_{con} := 40 \text{ mm}$
	<i>PipelineDensity</i>	$\rho_p := 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ConcreteDensity</i>	$\rho_{con} := 3040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>MarineGrowthDensity</i>	$\rho_m := 1325 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>ContentDensity</i>	$\rho_f := 31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
2. Environmental Data	<i>SignificantWaveHeight</i>	$H_s := 3.97 \text{ m}$
	<i>PeakPeriod</i>	$T_p := 10.5 \text{ s}$
	<i>WaterDepth</i>	$d := 100 \text{ m}$
	<i>CurrentVelocity</i> (99 m)	$U_{ref} := 0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>CurrentReferencePoint</i>	$Z_r := 3 \text{ m}$ above seabed
	<i>SeaWaterKinematicViscosity</i>	$\nu_{sw} := 1.10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
	<i>SeaWaterDensity</i>	$\rho_{sw} := 1025 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	<i>WaveAngletoPipe</i>	$\theta := 90 \text{ deg}$
3. Soil Data	<i>SoilType</i>	Clay

SoilRoughness

$$Z_0 := 3.25 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

SoilShearStrength

$$S_u := 2 \text{ kPa}$$

DryUnitSoilWeight

$$\gamma_s := 18000 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$$

B. Calculation

1. Calculation For Weight

1.1. Total Diameter

$$D_{tot} := OD + 2 \cdot t_{con}$$

$$D_{tot} = 0.39 \text{ m}$$

1.2. Pipe Weight

$$W_p := \frac{\pi}{4} \cdot \left(OD^2 - (OD - 2 \cdot t_w)^2 \right) \cdot \rho_p \cdot g$$

$$W_p = (1.79 \cdot 10^3) \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.3. Concrete Weight

$$W_{con} := \frac{\pi}{4} \cdot \left((OD + 2 \cdot t_{con})^2 - (OD)^2 \right) \cdot \rho_{con} \cdot g$$

$$W_{con} = 593.247 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

1.4. Product Weight

$$W_f := \frac{\pi}{4} \cdot (OD - 2 \cdot t_w)^2 \cdot \rho_f \cdot g$$

$$Wf=23.123 \frac{N}{m}$$

1.5. Buoyancy

$$b:=\rho_{sw} \cdot g \cdot D_{tot}^2 \cdot \frac{\pi}{4}$$

$$b=(1.198 \cdot 10^3) \frac{N}{m}$$

1.6. Actual Submerge

$$W_{sv}:=\left(W_p+W_{con}+Wf-b\right)$$

$$W_{sv}=(1.208 \cdot 10^3) \frac{N}{m}$$

2. Calculation For Environmental

2.1. One Seventh Power

$$dr:=d-Zr$$

$$d_{ref}:=99 \text{ m}$$

$$Ur:=U_{ref} \cdot \left(\frac{d-dr}{d-d_{ref}} \right)^{\frac{1}{7}}$$

$$Ur=0.971 \frac{m}{s}$$

2.2. Average Current Velocity

$$V := V_{Zr} \cdot \left(\frac{\left(1 + \frac{Z_0}{Dt_{ot}} \right) \cdot \left(\ln \left(\frac{Dt_{ot}}{Z_0} + 1 \right) - 1 \right)}{\ln \left(\frac{Z_r}{Z_0} + 1 \right)} \right) \cdot \sin(\theta)$$

$$V = 0.949 \frac{m}{s}$$

2.3. Spektrum Jonswap

Lampiran B

2.4. Velocity Period

$$T_n := \sqrt{\frac{d}{g}} = 3.193 \text{ s}$$

$$T_u := 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{M_0}{M_2}} \cdot s = 5.423 \text{ s}$$

$$\tau := \frac{T_{storm}}{T_u} = 1.992 \cdot 10^3$$

$$k := \begin{array}{l|l} \text{if } \gamma = 1 & \\ \parallel & 1.25 \\ \text{else if } \gamma = 3.3 & \\ \parallel & 1.21 \\ \text{else} & \\ \parallel & 1.17 \end{array}$$

$$k = 1.25$$

$$T := \begin{cases} \text{if } \frac{T_n}{T_u} \leq 0.2 \\ \quad \parallel k - 5 \cdot (k - 1) \cdot T_n \\ \text{else} \\ \quad \parallel T_u \end{cases}$$

$$T = 5.423 \text{ s}$$

2.5. Significant Velocity

$$U_s := 2 \cdot \sqrt{M_0} \cdot \frac{m}{s} = 0.084 \frac{m}{s}$$

$$U := U_s \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2 \cdot \ln(\tau)}} \right)$$

$$U = 0.17 \frac{m}{s}$$

3. Calculation For Reduction Factor

3.1. Penetration factor

$$G_c := \frac{S_u}{D_{tot} \cdot \gamma_s} = 0.285$$

$$K_c := \frac{S_u \cdot D_{tot}}{W_{sv}} = 0.645$$

$$Z_p := \begin{cases} \text{if } S_u = 0 \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot 0.037 \cdot K_s^{-0.67} \\ \text{else} \\ \quad \parallel D_{tot} \cdot \left(0.0071 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{3.2} + 0.062 \cdot \left(\frac{G_c^{0.3}}{K_c} \right)^{0.7} \right) \end{cases}$$

$$Z_p = 0.029 \text{ m}$$

$$r_{peny} := 1 - 1.4 \cdot \frac{Z_p}{D_{tot}}$$

$$r_{peny} = 0.897$$

$$r_{penz} := 1 - 1.3 \cdot \left(\frac{Z_p}{D_{tot}} - 0.1 \right)$$

$$r_{penz} = 1.035$$

3.2. Permeable factor

$$r_{permz} := 0.7$$

3.3. Total Reduction Factor

$$r_{toty} := r_{peny} \cdot r_{try} = 0.897$$

$$r_{totz} := r_{penz} \cdot r_{permz} \cdot r_{trz} = 0.724$$

4. Calculation For Force

4.1. Single Oscillation Keulegan-Carpenter Number

$$K := \frac{U \cdot T}{D_{tot}}$$

$$K = 2.372$$

4.2. Single Oscillation Steady to Oscillatory Design Ratio

$$M := \frac{V}{U}$$

$$M = 5.567$$

4.3. Passive Soil Resistance

$$Fr := \begin{cases} \text{if } Su = 0 \\ \begin{cases} \text{if } Ks \leq 26.7 \\ \left(5 \cdot Ks - 0.15 \cdot Ks^2 \right) \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \\ \text{else} \\ Ks \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.25} \end{cases} \\ \text{else} \\ \frac{4.1 \cdot Su \cdot Dtot}{Gc^{0.39}} \cdot \left(\frac{Zp}{Dtot} \right)^{1.31} \end{cases}$$

$$Fr = 170.268 \frac{N}{m}$$

4.4. Coefficient Y & Z

Dari Tabel didapat kan :

$$Cy = 1.159$$

Dari Tabel didapat kan :

$$Cz = 0.91$$

4.5. Horizontal Hydrodynamic Load

$$F_y := r_{toty} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_y \cdot (U + V)^2$$

$$F_y = 260.163 \frac{N}{m}$$

4.6. Vertical Hydrodynamic Load

$$F_z := r_{totz} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{sw} \cdot D_{tot} \cdot C_z \cdot (U + V)^2$$

$$F_z = 164.852 \frac{N}{m}$$

4.7. Weight Submerged Lateral Requirement

$$W_s := \gamma_{sc} \cdot (F_y + \mu \cdot F_z) - Fr$$

$$W_s = 907.461 \frac{N}{m}$$

C. Criteria

1. Vertical

$$CriteriaVertical := \left. \begin{array}{l} \text{if } \gamma_w \cdot \frac{b}{W_s + b} \leq 1 \\ \quad \parallel \text{“Accepted”} \\ \text{else} \\ \quad \parallel \text{“Not Accepted”} \end{array} \right| = \text{“Accepted”}$$

2. Lateral

$$CriteriaLateral.1 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{(F_y + \mu \cdot F_z)}{\mu \cdot W_s + F_r} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

$$CriteriaLateral.2 := \text{if } \gamma_{sc} \cdot \frac{F_z}{W_s} \leq 1 \left| \begin{array}{l} \text{"Accepted"} \\ \text{else} \\ \text{"Not Accepted"} \end{array} \right. = \text{"Accepted"}$$

D. Safety Factor

$$SF := \frac{W_{sv}}{W_s} = 1.331$$

$$SF = 1.331$$

LAMPIRAN B

Perhitungan Spektrum JONSWAP

Case 1 - Kosong

A. Menghitung Nilai Konstanta Generalized Philips

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

$$\alpha = 0,0066$$

B. Menentukan Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

C. Menghitung Nilai *Peak-Enhancement Factor*

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$\varphi = 5,2683$$

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

$$\gamma = 1$$

D. Menghitung Nilai Frekuensi Gelombang Puncak

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$\omega_p = 0,6478$$

E. Menghitung Spektrum JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)}$$

F. Menghitung Nilai Angka Gelombang

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Tabel B.1 Iterasi Angka Gelombang Case 1 Kosong

k asumsi	tanh(kd)	k	Error
0,0428	0,9997	0,04279707954970000	0,0273%
0,0428	0,9997	0,04279705120471930	0,0001%
0,0428	0,9997	0,04279705127342380	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325730	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%
0,0428	0,9997	0,04279705127325770	0,0000%

$$k = 0,428$$

G. Menghitung Nilai *Transfer Function*

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}$$

H. Menghitung Nilai *Wave Induced Velocity Spectrum*

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

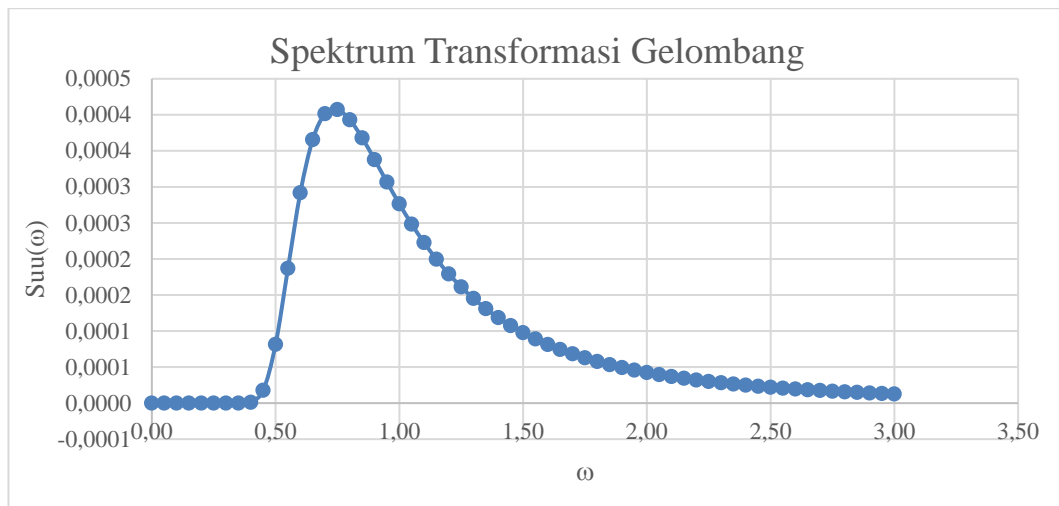
Tabel B.2 Perhitungan *Wave Induced Velocity Spectrum* Case 1 Kosong

ω	ω_p	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	m0	m1	m2	m4
0,00	0,65	0,07	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,05	0,65	0,07	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,10	0,65	0,07	0,0000	0,0023	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,15	0,65	0,07	0,0000	0,0035	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	0,65	0,07	0,0000	0,0047	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,25	0,65	0,07	0,0000	0,0058	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

0,30	0,65	0,07	0,0000	0,0070	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,35	0,65	0,07	0,0001	0,0082	0,0001	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,40	0,65	0,07	0,0114	0,0093	0,0001	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,45	0,65	0,07	0,1600	0,0105	0,0001	0,0000	4	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
0,50	0,65	0,07	0,5983	0,0117	0,0001	0,0001	2	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000
0,55	0,65	0,07	1,1341	0,0128	0,0002	0,0002	4	0,0007	0,0004	0,0002	0,0001
0,60	0,65	0,07	1,4883	0,0140	0,0002	0,0003	2	0,0006	0,0004	0,0002	0,0001
0,65	0,65	0,09	1,5883	0,0152	0,0002	0,0004	4	0,0015	0,0010	0,0006	0,0003
0,70	0,65	0,09	1,5043	0,0163	0,0003	0,0004	2	0,0008	0,0006	0,0004	0,0002
0,75	0,65	0,09	1,3290	0,0175	0,0003	0,0004	4	0,0016	0,0012	0,0009	0,0005
0,80	0,65	0,09	1,1275	0,0187	0,0003	0,0004	2	0,0008	0,0006	0,0005	0,0003
0,85	0,65	0,09	0,9348	0,0198	0,0004	0,0004	4	0,0015	0,0013	0,0011	0,0008
0,90	0,65	0,09	0,7656	0,0210	0,0004	0,0003	2	0,0007	0,0006	0,0005	0,0004
0,95	0,65	0,09	0,6236	0,0222	0,0005	0,0003	4	0,0012	0,0012	0,0011	0,0010
1,00	0,65	0,09	0,5074	0,0233	0,0005	0,0003	2	0,0006	0,0006	0,0006	0,0006
1,05	0,65	0,09	0,4133	0,0245	0,0006	0,0002	4	0,0010	0,0010	0,0011	0,0012
1,10	0,65	0,09	0,3378	0,0257	0,0007	0,0002	2	0,0004	0,0005	0,0005	0,0007
1,15	0,65	0,09	0,2772	0,0268	0,0007	0,0002	4	0,0008	0,0009	0,0011	0,0014
1,20	0,65	0,09	0,2285	0,0280	0,0008	0,0002	2	0,0004	0,0004	0,0005	0,0007
1,25	0,65	0,09	0,1893	0,0292	0,0009	0,0002	4	0,0006	0,0008	0,0010	0,0016
1,30	0,65	0,09	0,1577	0,0303	0,0009	0,0001	2	0,0003	0,0004	0,0005	0,0008
1,35	0,65	0,09	0,1320	0,0315	0,0010	0,0001	4	0,0005	0,0007	0,0010	0,0017
1,40	0,65	0,09	0,1110	0,0327	0,0011	0,0001	2	0,0002	0,0003	0,0005	0,0009
1,45	0,65	0,09	0,0938	0,0338	0,0011	0,0001	4	0,0004	0,0006	0,0009	0,0019
1,50	0,65	0,09	0,0797	0,0350	0,0012	0,0001	2	0,0002	0,0003	0,0004	0,0010
1,55	0,65	0,09	0,0680	0,0362	0,0013	0,0001	4	0,0004	0,0006	0,0009	0,0021
1,60	0,65	0,09	0,0583	0,0373	0,0014	0,0001	2	0,0002	0,0003	0,0004	0,0011
1,65	0,65	0,09	0,0502	0,0385	0,0015	0,0001	4	0,0003	0,0005	0,0008	0,0022
1,70	0,65	0,09	0,0434	0,0397	0,0016	0,0001	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0011
1,75	0,65	0,09	0,0376	0,0408	0,0017	0,0001	4	0,0003	0,0004	0,0008	0,0024
1,80	0,65	0,09	0,0328	0,0420	0,0018	0,0001	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0012
1,85	0,65	0,09	0,0286	0,0432	0,0019	0,0001	4	0,0002	0,0004	0,0007	0,0025
1,90	0,65	0,09	0,0251	0,0443	0,0020	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0013
1,95	0,65	0,09	0,0221	0,0455	0,0021	0,0000	4	0,0002	0,0004	0,0007	0,0026
2,00	0,65	0,09	0,0195	0,0467	0,0022	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0003	0,0014
2,05	0,65	0,09	0,0172	0,0478	0,0023	0,0000	4	0,0002	0,0003	0,0007	0,0028
2,10	0,65	0,09	0,0153	0,0490	0,0024	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0003	0,0014
2,15	0,65	0,09	0,0136	0,0502	0,0025	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0006	0,0029
2,20	0,65	0,09	0,0122	0,0513	0,0026	0,0000	2	0,0001	0,0001	0,0003	0,0015
2,25	0,65	0,09	0,0109	0,0525	0,0028	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0006	0,0031
2,30	0,65	0,09	0,0097	0,0537	0,0029	0,0000	2	0,0001	0,0001	0,0003	0,0016
2,35	0,65	0,09	0,0088	0,0548	0,0030	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0006	0,0032
2,40	0,65	0,09	0,0079	0,0560	0,0031	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0016

2,45	0,65	0,09	0,0071	0,0572	0,0033	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0006	0,0034
2,50	0,65	0,09	0,0064	0,0583	0,0034	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0017
2,55	0,65	0,09	0,0058	0,0595	0,0035	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0005	0,0035
2,60	0,65	0,09	0,0053	0,0607	0,0037	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0018
2,65	0,65	0,09	0,0048	0,0618	0,0038	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0005	0,0036
2,70	0,65	0,09	0,0044	0,0630	0,0040	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0019
2,75	0,65	0,09	0,0040	0,0642	0,0041	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0005	0,0038
2,80	0,65	0,09	0,0037	0,0654	0,0043	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0002	0,0019
2,85	0,65	0,09	0,0034	0,0665	0,0044	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0005	0,0039
2,90	0,65	0,09	0,0031	0,0677	0,0046	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0002	0,0020
2,95	0,65	0,09	0,0028	0,0689	0,0047	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0005	0,0041
3,00	0,65	0,09	0,0026	0,0700	0,0049	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0001	0,0010
						Total		0,0184	0,0205	0,0276	0,0846

Yang Kemudian diplotkan dalam grafik berikut :



I. Menghitung Momen Spektra

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$$

$$M_0 = 0,0003$$

$$M_1 = 0,0003$$

$$M_2 = 0,0005$$

$$M_4 = 0,0014$$

Case 1 – Operasional Max

A. Menghitung Nilai Konstanta Generalized Philips

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

$$\alpha = 0,0066$$

B. Menentukan Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

C. Menghitung Nilai *Peak-Enhancement Factor*

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$\varphi = 5,2698$$

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

$$\gamma = 1$$

D. Menghitung Nilai Frekuensi Gelombang Puncak

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$\omega_p = 0,5984$$

E. Menghitung Spektrum JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)}$$

F. Menghitung Nilai Angka Gelombang

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Tabel B.3 Iterasi Angka Gelombang Case 1 Operasional

k asumsi	tanh(kd)	k	Error
0,0365	0,9990	0,03655083972096160	0,1006%
0,0366	0,9990	0,03655055971550050	0,0008%
0,0366	0,9990	0,03655056184075240	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182462120	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474360	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474270	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474270	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474270	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474270	0,0000%
0,0366	0,9990	0,03655056182474270	0,0000%

$$k = 0,0366$$

G. Menghitung Nilai *Transfer Function*

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}$$

H. Menghitung Nilai *Wave Induced Velocity Spectrum*

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

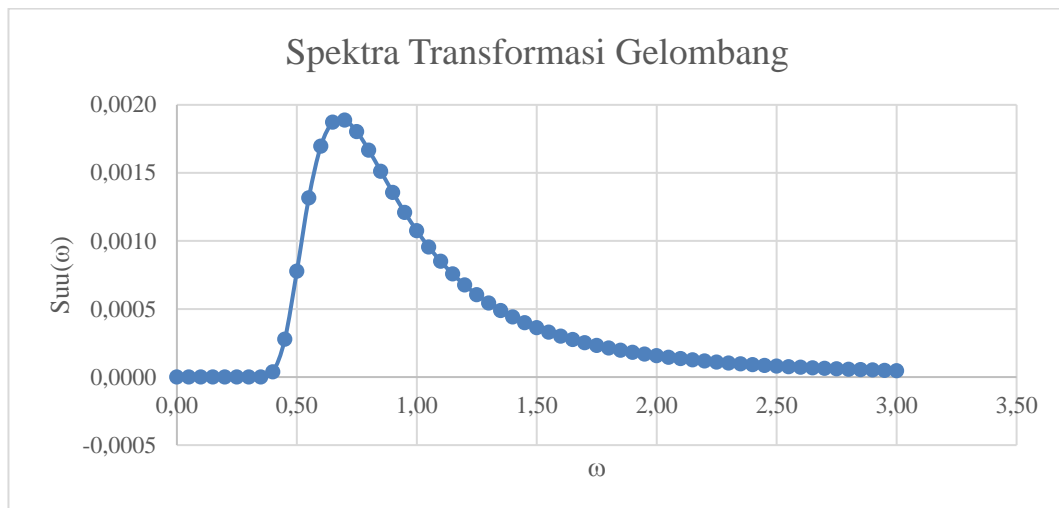
Tabel B.4 Perhitungan *Wave Induced Velocity Spectrum* Case 1 Operasional

ω	ωp	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	m0	m1	m2	m4
0,00	0,60	0,07	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,05	0,60	0,07	0,0000	0,0022	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,10	0,60	0,07	0,0000	0,0045	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,15	0,60	0,07	0,0000	0,0067	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	0,60	0,07	0,0000	0,0089	0,0001	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,25	0,60	0,07	0,0000	0,0112	0,0001	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

0,30	0,60	0,07	0,0000	0,0134	0,0002	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,35	0,60	0,07	0,0028	0,0156	0,0002	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,40	0,60	0,07	0,1178	0,0179	0,0003	0,0000	2	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
0,45	0,60	0,07	0,6868	0,0201	0,0004	0,0003	4	0,0011	0,0005	0,0002	0,0000
0,50	0,60	0,07	1,5553	0,0224	0,0005	0,0008	2	0,0016	0,0008	0,0004	0,0001
0,55	0,60	0,07	2,1772	0,0246	0,0006	0,0013	4	0,0053	0,0029	0,0016	0,0005
0,60	0,60	0,09	2,3580	0,0268	0,0007	0,0017	2	0,0034	0,0020	0,0012	0,0004
0,65	0,60	0,09	2,2176	0,0291	0,0008	0,0019	4	0,0075	0,0049	0,0032	0,0013
0,70	0,60	0,09	1,9275	0,0313	0,0010	0,0019	2	0,0038	0,0026	0,0019	0,0009
0,75	0,60	0,09	1,6036	0,0335	0,0011	0,0018	4	0,0072	0,0054	0,0041	0,0023
0,80	0,60	0,09	1,3032	0,0358	0,0013	0,0017	2	0,0033	0,0027	0,0021	0,0014
0,85	0,60	0,09	1,0470	0,0380	0,0014	0,0015	4	0,0060	0,0051	0,0044	0,0032
0,90	0,60	0,09	0,8377	0,0402	0,0016	0,0014	2	0,0027	0,0024	0,0022	0,0018
0,95	0,60	0,09	0,6704	0,0425	0,0018	0,0012	4	0,0048	0,0046	0,0044	0,0039
1,00	0,60	0,09	0,5380	0,0447	0,0020	0,0011	2	0,0022	0,0022	0,0022	0,0022
1,05	0,60	0,09	0,4337	0,0469	0,0022	0,0010	4	0,0038	0,0040	0,0042	0,0046
1,10	0,60	0,09	0,3515	0,0492	0,0024	0,0009	2	0,0017	0,0019	0,0021	0,0025
1,15	0,60	0,09	0,2865	0,0514	0,0026	0,0008	4	0,0030	0,0035	0,0040	0,0053
1,20	0,60	0,09	0,2349	0,0536	0,0029	0,0007	2	0,0014	0,0016	0,0019	0,0028
1,25	0,60	0,09	0,1938	0,0559	0,0031	0,0006	4	0,0024	0,0030	0,0038	0,0059
1,30	0,60	0,09	0,1608	0,0581	0,0034	0,0005	2	0,0011	0,0014	0,0018	0,0031
1,35	0,60	0,09	0,1342	0,0604	0,0036	0,0005	4	0,0020	0,0026	0,0036	0,0065
1,40	0,60	0,09	0,1126	0,0626	0,0039	0,0004	2	0,0009	0,0012	0,0017	0,0034
1,45	0,60	0,09	0,0950	0,0648	0,0042	0,0004	4	0,0016	0,0023	0,0034	0,0071
1,50	0,60	0,09	0,0806	0,0671	0,0045	0,0004	2	0,0007	0,0011	0,0016	0,0037
1,55	0,60	0,09	0,0687	0,0693	0,0048	0,0003	4	0,0013	0,0020	0,0032	0,0076
1,60	0,60	0,09	0,0588	0,0715	0,0051	0,0003	2	0,0006	0,0010	0,0015	0,0039
1,65	0,60	0,09	0,0505	0,0738	0,0054	0,0003	4	0,0011	0,0018	0,0030	0,0082
1,70	0,60	0,09	0,0436	0,0760	0,0058	0,0003	2	0,0005	0,0009	0,0015	0,0042
1,75	0,60	0,09	0,0378	0,0782	0,0061	0,0002	4	0,0009	0,0016	0,0028	0,0087
1,80	0,60	0,09	0,0329	0,0805	0,0065	0,0002	2	0,0004	0,0008	0,0014	0,0045
1,85	0,60	0,09	0,0287	0,0827	0,0068	0,0002	4	0,0008	0,0015	0,0027	0,0092
1,90	0,60	0,09	0,0252	0,0849	0,0072	0,0002	2	0,0004	0,0007	0,0013	0,0047
1,95	0,60	0,09	0,0222	0,0872	0,0076	0,0002	4	0,0007	0,0013	0,0026	0,0097
2,00	0,60	0,09	0,0195	0,0894	0,0080	0,0002	2	0,0003	0,0006	0,0012	0,0050
2,05	0,60	0,09	0,0173	0,0917	0,0084	0,0001	4	0,0006	0,0012	0,0024	0,0103
2,10	0,60	0,09	0,0153	0,0939	0,0088	0,0001	2	0,0003	0,0006	0,0012	0,0053
2,15	0,60	0,09	0,0136	0,0961	0,0092	0,0001	4	0,0005	0,0011	0,0023	0,0108
2,20	0,60	0,09	0,0122	0,0984	0,0097	0,0001	2	0,0002	0,0005	0,0011	0,0055
2,25	0,60	0,09	0,0109	0,1006	0,0101	0,0001	4	0,0004	0,0010	0,0022	0,0113
2,30	0,60	0,09	0,0098	0,1028	0,0106	0,0001	2	0,0002	0,0005	0,0011	0,0058
2,35	0,60	0,09	0,0088	0,1051	0,0110	0,0001	4	0,0004	0,0009	0,0021	0,0118
2,40	0,60	0,09	0,0079	0,1073	0,0115	0,0001	2	0,0002	0,0004	0,0010	0,0060

2,45	0,60	0,09	0,0071	0,1095	0,0120	0,0001	4	0,0003	0,0008	0,0021	0,0123
2,50	0,60	0,09	0,0064	0,1118	0,0125	0,0001	2	0,0002	0,0004	0,0010	0,0063
2,55	0,60	0,09	0,0058	0,1140	0,0130	0,0001	4	0,0003	0,0008	0,0020	0,0128
2,60	0,60	0,09	0,0053	0,1162	0,0135	0,0001	2	0,0001	0,0004	0,0010	0,0065
2,65	0,60	0,09	0,0048	0,1185	0,0140	0,0001	4	0,0003	0,0007	0,0019	0,0133
2,70	0,60	0,09	0,0044	0,1207	0,0146	0,0001	2	0,0001	0,0003	0,0009	0,0068
2,75	0,60	0,09	0,0040	0,1229	0,0151	0,0001	4	0,0002	0,0007	0,0018	0,0138
2,80	0,60	0,09	0,0037	0,1252	0,0157	0,0001	2	0,0001	0,0003	0,0009	0,0071
2,85	0,60	0,09	0,0034	0,1274	0,0162	0,0001	4	0,0002	0,0006	0,0018	0,0144
2,90	0,60	0,09	0,0031	0,1297	0,0168	0,0001	2	0,0001	0,0003	0,0009	0,0073
2,95	0,60	0,09	0,0028	0,1319	0,0174	0,0000	4	0,0002	0,0006	0,0017	0,0149
3,00	0,60	0,09	0,0026	0,1341	0,0180	0,0000	1	0,0000	0,0001	0,0004	0,0038
						Total		0,0796	0,0833	0,1070	0,3146
								0,0013	0,0014	0,0018	0,0052

Yang Kemudian diplotkan dalam grafik berikut :



I. Menghitung Momen Spektra

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$$

$$M_0 = 0,0801$$

$$M_1 = 0,0841$$

$$M_2 = 0,1083$$

$$M_4 = 0,3197$$

Case 2 - Kosong

A. Menghitung Nilai Konstanta Generalized Philips

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

$$\alpha = 0,0066$$

B. Menentukan Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

C. Menghitung Nilai *Peak-Enhancement Factor*

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$\varphi = 5,2683$$

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

$$\gamma = 1$$

D. Menghitung Nilai Frekuensi Gelombang Puncak

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$\omega_p = 0,6478$$

E. Menghitung Spektrum JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma\omega_p}\right)^2\right)}$$

F. Menghitung Nilai Angka Gelombang

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Tabel B.5 Iterasi Angka Gelombang Case 2 Kosong

k asumsi	tanh(kd)	k	Error
0,0428	0,9996	0,04280184773851680	0,0384%
0,0428	0,9996	0,04280179370888730	0,0001%
0,0428	0,9996	0,04280179388607560	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549450	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%
0,0428	0,9996	0,04280179388549640	0,0000%

$$k = 0,428$$

G. Menghitung Nilai *Transfer Function*

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}$$

H. Menghitung Nilai *Wave Induced Velocity Spectrum*

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

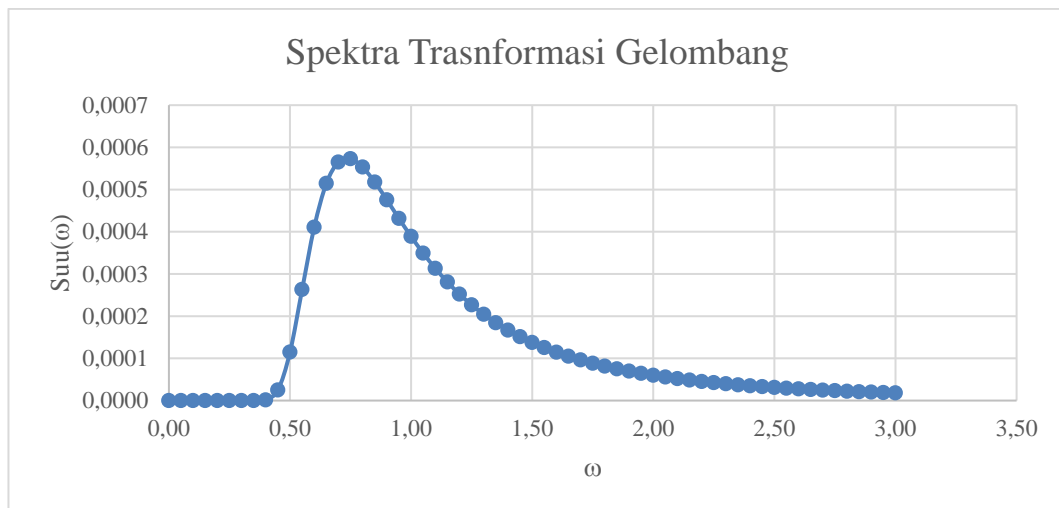
Tabel B.6 Perhitungan *Wave Induced Velocity Spectrum* Case 2 Kosong

ω	ωp	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	m0	m1	m2	m4
0,00	0,65	0,07	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,05	0,65	0,07	0,0000	0,0014	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,10	0,65	0,07	0,0000	0,0028	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,15	0,65	0,07	0,0000	0,0042	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	0,65	0,07	0,0000	0,0055	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,25	0,65	0,07	0,0000	0,0069	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

0,30	0,65	0,07	0,0000	0,0083	0,0001	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,35	0,65	0,07	0,0001	0,0097	0,0001	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,40	0,65	0,07	0,0114	0,0111	0,0001	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,45	0,65	0,07	0,1600	0,0125	0,0002	0,0000	4	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
0,50	0,65	0,07	0,5983	0,0138	0,0002	0,0001	2	0,0002	0,0001	0,0001	0,0000
0,55	0,65	0,07	1,1341	0,0152	0,0002	0,0003	4	0,0011	0,0006	0,0003	0,0001
0,60	0,65	0,07	1,4883	0,0166	0,0003	0,0004	2	0,0008	0,0005	0,0003	0,0001
0,65	0,65	0,09	1,5883	0,0180	0,0003	0,0005	4	0,0021	0,0013	0,0009	0,0004
0,70	0,65	0,09	1,5043	0,0194	0,0004	0,0006	2	0,0011	0,0008	0,0006	0,0003
0,75	0,65	0,09	1,3290	0,0208	0,0004	0,0006	4	0,0023	0,0017	0,0013	0,0007
0,80	0,65	0,09	1,1275	0,0221	0,0005	0,0006	2	0,0011	0,0009	0,0007	0,0005
0,85	0,65	0,09	0,9348	0,0235	0,0006	0,0005	4	0,0021	0,0018	0,0015	0,0011
0,90	0,65	0,09	0,7656	0,0249	0,0006	0,0005	2	0,0010	0,0009	0,0008	0,0006
0,95	0,65	0,09	0,6236	0,0263	0,0007	0,0004	4	0,0017	0,0016	0,0016	0,0014
1,00	0,65	0,09	0,5074	0,0277	0,0008	0,0004	2	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
1,05	0,65	0,09	0,4133	0,0291	0,0008	0,0003	4	0,0014	0,0015	0,0015	0,0017
1,10	0,65	0,09	0,3378	0,0305	0,0009	0,0003	2	0,0006	0,0007	0,0008	0,0009
1,15	0,65	0,09	0,2772	0,0318	0,0010	0,0003	4	0,0011	0,0013	0,0015	0,0020
1,20	0,65	0,09	0,2285	0,0332	0,0011	0,0003	2	0,0005	0,0006	0,0007	0,0010
1,25	0,65	0,09	0,1893	0,0346	0,0012	0,0002	4	0,0009	0,0011	0,0014	0,0022
1,30	0,65	0,09	0,1577	0,0360	0,0013	0,0002	2	0,0004	0,0005	0,0007	0,0012
1,35	0,65	0,09	0,1320	0,0374	0,0014	0,0002	4	0,0007	0,0010	0,0013	0,0024
1,40	0,65	0,09	0,1110	0,0388	0,0015	0,0002	2	0,0003	0,0005	0,0007	0,0013
1,45	0,65	0,09	0,0938	0,0401	0,0016	0,0002	4	0,0006	0,0009	0,0013	0,0027
1,50	0,65	0,09	0,0797	0,0415	0,0017	0,0001	2	0,0003	0,0004	0,0006	0,0014
1,55	0,65	0,09	0,0680	0,0429	0,0018	0,0001	4	0,0005	0,0008	0,0012	0,0029
1,60	0,65	0,09	0,0583	0,0443	0,0020	0,0001	2	0,0002	0,0004	0,0006	0,0015
1,65	0,65	0,09	0,0502	0,0457	0,0021	0,0001	4	0,0004	0,0007	0,0011	0,0031
1,70	0,65	0,09	0,0434	0,0471	0,0022	0,0001	2	0,0002	0,0003	0,0006	0,0016
1,75	0,65	0,09	0,0376	0,0484	0,0023	0,0001	4	0,0004	0,0006	0,0011	0,0033
1,80	0,65	0,09	0,0328	0,0498	0,0025	0,0001	2	0,0002	0,0003	0,0005	0,0017
1,85	0,65	0,09	0,0286	0,0512	0,0026	0,0001	4	0,0003	0,0006	0,0010	0,0035
1,90	0,65	0,09	0,0251	0,0526	0,0028	0,0001	2	0,0001	0,0003	0,0005	0,0018
1,95	0,65	0,09	0,0221	0,0540	0,0029	0,0001	4	0,0003	0,0005	0,0010	0,0037
2,00	0,65	0,09	0,0195	0,0554	0,0031	0,0001	2	0,0001	0,0002	0,0005	0,0019
2,05	0,65	0,09	0,0172	0,0568	0,0032	0,0001	4	0,0002	0,0005	0,0009	0,0039
2,10	0,65	0,09	0,0153	0,0581	0,0034	0,0001	2	0,0001	0,0002	0,0005	0,0020
2,15	0,65	0,09	0,0136	0,0595	0,0035	0,0000	4	0,0002	0,0004	0,0009	0,0041
2,20	0,65	0,09	0,0122	0,0609	0,0037	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0021
2,25	0,65	0,09	0,0109	0,0623	0,0039	0,0000	4	0,0002	0,0004	0,0009	0,0043
2,30	0,65	0,09	0,0097	0,0637	0,0041	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0022
2,35	0,65	0,09	0,0088	0,0651	0,0042	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0008	0,0045
2,40	0,65	0,09	0,0079	0,0664	0,0044	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0023

2,45	0,65	0,09	0,0071	0,0678	0,0046	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0008	0,0047
2,50	0,65	0,09	0,0064	0,0692	0,0048	0,0000	2	0,0001	0,0002	0,0004	0,0024
2,55	0,65	0,09	0,0058	0,0706	0,0050	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0008	0,0049
2,60	0,65	0,09	0,0053	0,0720	0,0052	0,0000	2	0,0001	0,0001	0,0004	0,0025
2,65	0,65	0,09	0,0048	0,0734	0,0054	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0007	0,0051
2,70	0,65	0,09	0,0044	0,0748	0,0056	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0004	0,0026
2,75	0,65	0,09	0,0040	0,0761	0,0058	0,0000	4	0,0001	0,0003	0,0007	0,0053
2,80	0,65	0,09	0,0037	0,0775	0,0060	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0027
2,85	0,65	0,09	0,0034	0,0789	0,0062	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0007	0,0055
2,90	0,65	0,09	0,0031	0,0803	0,0064	0,0000	2	0,0000	0,0001	0,0003	0,0028
2,95	0,65	0,09	0,0028	0,0817	0,0067	0,0000	4	0,0001	0,0002	0,0007	0,0057
3,00	0,65	0,09	0,0026	0,0831	0,0069	0,0000	1	0,0000	0,0001	0,0002	0,0014
						Total		0,0259	0,0288	0,0388	0,1191

Yang Kemudian diplotkan dalam grafik berikut :



I. Menghitung Momen Spektra

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$$

$$M_0 = 0,0004$$

$$M_1 = 0,0005$$

$$M_2 = 0,0006$$

$$M_4 = 0,0020$$

Case 2 – Operasional Max

A. Menghitung Nilai Konstanta Generalized Philips

$$\alpha = \frac{5}{16} \cdot \frac{H_s^2 \cdot \omega_p^4}{g^2} \cdot (1 - 0,287 \cdot \ln \gamma)$$

$$\alpha = 0,5984$$

B. Menentukan Parameter Lebar Spektra

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{jika } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{jika } \omega > \omega_p \end{cases}$$

C. Menghitung Nilai *Peak-Enhancement Factor*

$$\varphi = \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}$$

$$\varphi = 5,2698$$

$$\gamma = \begin{cases} 5,0 & \varphi \leq 3,6 \\ \exp(5,75 - 1,15\varphi) & 3,6 < \varphi < 5,0; \\ 1,0 & \varphi \geq 5,0 \end{cases}$$

$$\gamma = 1$$

D. Menghitung Nilai Frekuensi Gelombang Puncak

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p}$$

$$\omega_p = 0,5984$$

E. Menghitung Spektrum JONSWAP

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \alpha \cdot g^2 \cdot \omega^{-5} \cdot \exp\left(-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right) \cdot \gamma^{\exp\left(-0,5\left(\frac{\omega-\omega_p}{\sigma \cdot \omega_p}\right)^2\right)}$$

F. Menghitung Nilai Angka Gelombang

$$\frac{\omega^2}{g} = k \cdot \tanh(k \cdot d)$$

Tabel B.7 Iterasi Angka Gelombang Case 2 Operasional

k asumsi	tanh(kd)	k	Error
0,0365	0,9987	0,03656331614635400	0,1348%
0,0366	0,9987	0,03656283352894120	-0,0013%
0,0366	0,9987	0,03656283823735600	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819141850	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186670	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186230	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186240	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186240	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186240	0,0000%
0,0366	0,9987	0,03656283819186240	0,0000%

$$k = 0,0366$$

G. Menghitung Nilai *Transfer Function*

$$G(\omega) = \frac{\omega}{\sinh(k \cdot d)}$$

H. Menghitung Nilai *Wave Induced Velocity Spectrum*

$$S_{UU}(\omega) = G^2(\omega) \cdot S_{\eta\eta}(\omega)$$

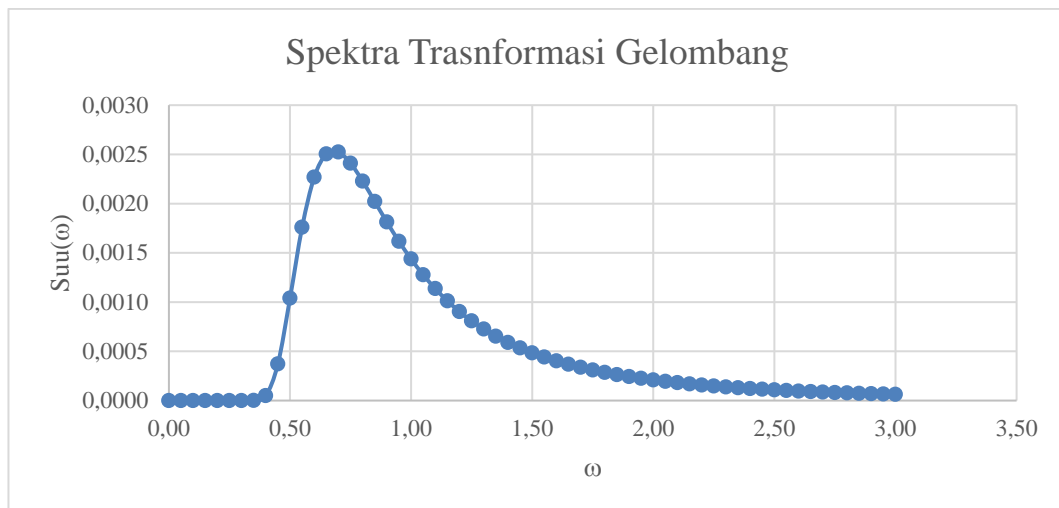
Tabel B.8 Perhitungan *Wave Induced Velocity Spectrum* Case 2 Operasional

ω	ωp	σ	$S_{\eta\eta}(\omega)$	$G(\omega)$	$G^2(\omega)$	$S_{uu}(\omega)$	FS	m0	m1	m2	m4
0,00	0,60	0,07	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,05	0,60	0,07	0,0000	0,0026	0,0000	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,10	0,60	0,07	0,0000	0,0052	0,0000	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,15	0,60	0,07	0,0000	0,0078	0,0001	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,20	0,60	0,07	0,0000	0,0103	0,0001	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,25	0,60	0,07	0,0000	0,0129	0,0002	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

0,30	0,60	0,07	0,0000	0,0155	0,0002	0,0000	2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,35	0,60	0,07	0,0028	0,0181	0,0003	0,0000	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,40	0,60	0,07	0,1178	0,0207	0,0004	0,0001	2	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
0,45	0,60	0,07	0,6868	0,0233	0,0005	0,0004	4	0,0015	0,0007	0,0003	0,0001
0,50	0,60	0,07	1,5553	0,0258	0,0007	0,0010	2	0,0021	0,0010	0,0005	0,0001
0,55	0,60	0,07	2,1772	0,0284	0,0008	0,0018	4	0,0070	0,0039	0,0021	0,0006
0,60	0,60	0,09	2,3580	0,0310	0,0010	0,0023	2	0,0045	0,0027	0,0016	0,0006
0,65	0,60	0,09	2,2176	0,0336	0,0011	0,0025	4	0,0100	0,0065	0,0042	0,0018
0,70	0,60	0,09	1,9275	0,0362	0,0013	0,0025	2	0,0050	0,0035	0,0025	0,0012
0,75	0,60	0,09	1,6036	0,0388	0,0015	0,0024	4	0,0096	0,0072	0,0054	0,0031
0,80	0,60	0,09	1,3032	0,0414	0,0017	0,0022	2	0,0045	0,0036	0,0029	0,0018
0,85	0,60	0,09	1,0470	0,0439	0,0019	0,0020	4	0,0081	0,0069	0,0058	0,0042
0,90	0,60	0,09	0,8377	0,0465	0,0022	0,0018	2	0,0036	0,0033	0,0029	0,0024
0,95	0,60	0,09	0,6704	0,0491	0,0024	0,0016	4	0,0065	0,0061	0,0058	0,0053
1,00	0,60	0,09	0,5380	0,0517	0,0027	0,0014	2	0,0029	0,0029	0,0029	0,0029
1,05	0,60	0,09	0,4337	0,0543	0,0029	0,0013	4	0,0051	0,0054	0,0056	0,0062
1,10	0,60	0,09	0,3515	0,0569	0,0032	0,0011	2	0,0023	0,0025	0,0027	0,0033
1,15	0,60	0,09	0,2865	0,0594	0,0035	0,0010	4	0,0040	0,0047	0,0054	0,0071
1,20	0,60	0,09	0,2349	0,0620	0,0038	0,0009	2	0,0018	0,0022	0,0026	0,0037
1,25	0,60	0,09	0,1938	0,0646	0,0042	0,0008	4	0,0032	0,0040	0,0051	0,0079
1,30	0,60	0,09	0,1608	0,0672	0,0045	0,0007	2	0,0015	0,0019	0,0025	0,0041
1,35	0,60	0,09	0,1342	0,0698	0,0049	0,0007	4	0,0026	0,0035	0,0048	0,0087
1,40	0,60	0,09	0,1126	0,0724	0,0052	0,0006	2	0,0012	0,0017	0,0023	0,0045
1,45	0,60	0,09	0,0950	0,0750	0,0056	0,0005	4	0,0021	0,0031	0,0045	0,0094
1,50	0,60	0,09	0,0806	0,0775	0,0060	0,0005	2	0,0010	0,0015	0,0022	0,0049
1,55	0,60	0,09	0,0687	0,0801	0,0064	0,0004	4	0,0018	0,0027	0,0042	0,0102
1,60	0,60	0,09	0,0588	0,0827	0,0068	0,0004	2	0,0008	0,0013	0,0021	0,0053
1,65	0,60	0,09	0,0505	0,0853	0,0073	0,0004	4	0,0015	0,0024	0,0040	0,0109
1,70	0,60	0,09	0,0436	0,0879	0,0077	0,0003	2	0,0007	0,0011	0,0019	0,0056
1,75	0,60	0,09	0,0378	0,0905	0,0082	0,0003	4	0,0012	0,0022	0,0038	0,0116
1,80	0,60	0,09	0,0329	0,0930	0,0087	0,0003	2	0,0006	0,0010	0,0018	0,0060
1,85	0,60	0,09	0,0287	0,0956	0,0091	0,0003	4	0,0011	0,0019	0,0036	0,0123
1,90	0,60	0,09	0,0252	0,0982	0,0096	0,0002	2	0,0005	0,0009	0,0018	0,0063
1,95	0,60	0,09	0,0222	0,1008	0,0102	0,0002	4	0,0009	0,0018	0,0034	0,0130
2,00	0,60	0,09	0,0195	0,1034	0,0107	0,0002	2	0,0004	0,0008	0,0017	0,0067
2,05	0,60	0,09	0,0173	0,1060	0,0112	0,0002	4	0,0008	0,0016	0,0033	0,0137
2,10	0,60	0,09	0,0153	0,1086	0,0118	0,0002	2	0,0004	0,0008	0,0016	0,0070
2,15	0,60	0,09	0,0136	0,1111	0,0124	0,0002	4	0,0007	0,0014	0,0031	0,0144
2,20	0,60	0,09	0,0122	0,1137	0,0129	0,0002	2	0,0003	0,0007	0,0015	0,0074
2,25	0,60	0,09	0,0109	0,1163	0,0135	0,0001	4	0,0006	0,0013	0,0030	0,0151
2,30	0,60	0,09	0,0098	0,1189	0,0141	0,0001	2	0,0003	0,0006	0,0015	0,0077
2,35	0,60	0,09	0,0088	0,1215	0,0148	0,0001	4	0,0005	0,0012	0,0029	0,0158
2,40	0,60	0,09	0,0079	0,1241	0,0154	0,0001	2	0,0002	0,0006	0,0014	0,0081

2,45	0,60	0,09	0,0071	0,1266	0,0160	0,0001	4	0,0005	0,0011	0,0027	0,0165
2,50	0,60	0,09	0,0064	0,1292	0,0167	0,0001	2	0,0002	0,0005	0,0013	0,0084
2,55	0,60	0,09	0,0058	0,1318	0,0174	0,0001	4	0,0004	0,0010	0,0026	0,0171
2,60	0,60	0,09	0,0053	0,1344	0,0181	0,0001	2	0,0002	0,0005	0,0013	0,0087
2,65	0,60	0,09	0,0048	0,1370	0,0188	0,0001	4	0,0004	0,0010	0,0025	0,0178
2,70	0,60	0,09	0,0044	0,1396	0,0195	0,0001	2	0,0002	0,0005	0,0012	0,0091
2,75	0,60	0,09	0,0040	0,1422	0,0202	0,0001	4	0,0003	0,0009	0,0024	0,0185
2,80	0,60	0,09	0,0037	0,1447	0,0209	0,0001	2	0,0002	0,0004	0,0012	0,0094
2,85	0,60	0,09	0,0034	0,1473	0,0217	0,0001	4	0,0003	0,0008	0,0024	0,0192
2,90	0,60	0,09	0,0031	0,1499	0,0225	0,0001	2	0,0001	0,0004	0,0012	0,0098
2,95	0,60	0,09	0,0028	0,1525	0,0233	0,0001	4	0,0003	0,0008	0,0023	0,0199
3,00	0,60	0,09	0,0026	0,1551	0,0240	0,0001	1	0,0001	0,0002	0,0006	0,0051
						Total		0,1064	0,1113	0,1430	0,4206

Yang Kemudian diplotkan dalam grafik berikut :



I. Menghitung Momen Spektra

$$M_n = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{UU}(\omega) d\omega$$

$$M_0 = 0,0018$$

$$M_1 = 0,0019$$

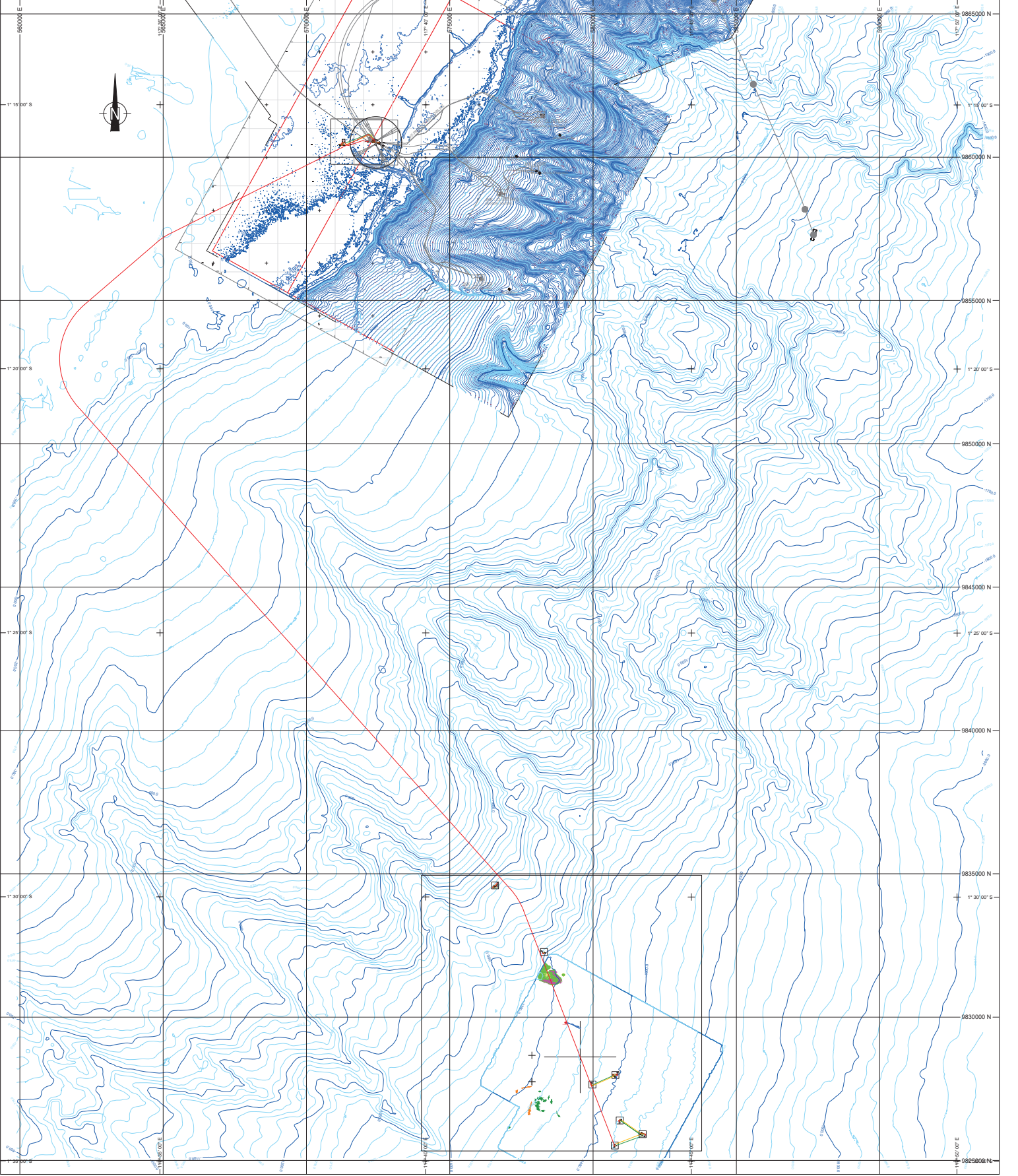
$$M_2 = 0,0024$$

$$M_4 = 0,0070$$

LAMPIRAN C

Data Batimetri *Field* di Selat Makassar

BATHYMETRIC MAP SCALE 1: 50000



BIODATA PENULIS



Kevin Mirekel Hamzah lahir di Malang pada tanggal 24 November 1995, merupakan anak keempat dari empat bersaudara dari pasangan Laurensius Agustino Hamzah dan Melanny Susilo. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SD Katolik Kolese Santo Yusup 3 Malang pada tahun 2008. Kemudian menyelesaikan jenjang pendidikan menengah di SMP Katolik Kolese Santo Yusup II Malang pada tahun 2011. Berikutnya pendidikan di SMA Katolik Santo Yusup Malang diselesaikan pada tahun 2014, dan melanjutkan ke jenjang pendidikan Strata 1 di Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya pada tahun yang sama. Penulis terdaftar dengan NRP 4314100135 yang selanjutnya berubah format menjadi 04311440000135. Selama menempuh kegiatan perkuliahan, penulis juga aktif di kegiatan organisasi dalam ITS, kegiatan kepanitiaan, kegiatan kerohanian baik di ITS maupun gereja, kegiatan kesukarelawanan, dan mengikuti seminar. Pada tahun 2017, penulis mendapatkan kesempatan untuk melaksanakan kerja praktek di Eni Muara Bakau B.V. di Jakarta selama 2 bulan. Pada semester 8, penulis menyusun tugas akhir yang berjudul “Analisis *On Bottom Stability Gas Pipeline* : Studi Kasus Pada Laut Dalam Di 1° 15’ S 117° 39’ E Selat Makassar”. Penulis dapat dihubungi melalui kevinmirekel@gmail.com.